

UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

“Comparación del efecto remediador de diferentes dosis de biochar de aliso (*Alnus acuminata*) sobre la calidad del suelo contaminado por metales pesados”

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

AUTORA: Chacon Soria, Alalis Noreli

ASESOR: Raúl Cajahuanca, Torres

HUÁNUCO – PERÚ
2026

U

D

H



UDH
UNIVERSIDAD DE HUANCAYO
<http://www.udh.edu.pe>

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 geológica

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): 75349449

DATOS DEL ASESOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 22511841

Grado/Título: Maestro en gestión pública

Código ORCID: 0000-0002-5671-1907

DATOS DE LOS JURADOS:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES	GRADO	DNI	Código ORCID
1	Cámara Llanos, Frank Erick	Doctor en ciencias de la salud	44287920	0000-0001-9180-7405
2	Calixto Vargas, Simeón Edmundo	Maestro en la administración de la educación	22471306	0000-0002-5114-4114
3	Vasquez Baca, Yasser	Título oficial de máster universitario en planificación territorial y gestión ambiental	42108318	0000-0002-7136-697X



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 17:00 horas del día 13 del mes de mayo del año 2026, 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:

- Dr. Frank Erick Camara Llanos (Presidente)
- Mg. Simeon Edmundo Calixto Vargas (Secretario)
- Mg. Yasser Vasquez Baca (Vocal)

Nombrados mediante la **Resolución N° 0663-2026-D-FI-UDH** para evaluar la Tesis intitulada: "**Comparación del efecto remediador de diferentes dosis de biochar de aliso (*Alnus acuminata*) sobre la calidad del suelo contaminado por metales pesados**", presentado por el (la) Bach. **CHACON SORIA, ALALIS NORELI** 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, declarando(a) Aprobada Por Unanimidad con el calificativo cuantitativo de 13 y cualitativo de Suficiente (Art. 47)

Siendo las 6:00 horas del día 13 del mes de Mayo del año 2026, los miembros del Jurado Calificador firman la presente Acta en señal de conformidad.

Dr. Frank Erick Camara Llanos
DNI: 44287920
ORCID: 0000-0001-9180-7405
Presidente

Mg Simeon Edmundo Calixto Varg
DNI: 22471306
ORCID: 0000-0002-5114-4114
Secretario

Mg. Yasser Vasquez Baca
DNI: 42108318
ORCID: 0000-0002-7136-697X
Vocal



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El comité de integridad científica, realizó la revisión del trabajo de investigación del estudiante: ALALIS NORELI CHACON SORIA, de la investigación titulada "Comparación del efecto remediador de diferentes dosis de biochar de aliso (*Alnus acuminata*) sobre la calidad del suelo contaminado por metales pesados", con asesor(a) RAUL CAJAHUANCA TORRES, designado(a) mediante documento: RESOLUCIÓN N° 2558-2024-D-FI-UDH del P. A. de INGENIERÍA AMBIENTAL.

Puede constar que la misma tiene un índice de similitud del 14 % 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, 31 de marzo de 2026



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

185. ALALIS NORELI CHACON SORIA.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

INDICE DE SIMILITUD

14%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.udh.edu.pe

Fuente de Internet

3%

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

2%

3

vsip.info

Fuente de Internet

1%

4

Submitted to Universidad de Huanuco

Trabajo del estudiante

1%

5

repositorio.unheval.edu.pe

Fuente de Internet

<1%



MANUEL E. ALIAGA VIDURIZAGA
D.N.I.: 71345687

cod. ORCID: 0009-0004-1375-5004

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a mi familia, por su apoyo incondicional y por ser mi fuente constante de motivación durante todo este proceso académico.

A mis padres, Graciela Marcelina Soria Garay y Epifanio Chacón Quispe, por inculcarme el valor del esfuerzo, la responsabilidad y la perseverancia; a mis docentes, por compartir sus conocimientos y guiarme con paciencia, compromiso y dedicación; y a mi cómplice, Yerseli Noreli Chacón Soria, por ser la mejor hermana que la vida me pudo dar y por acompañarme en cada paso con amor y alegría.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, fuente de vida, fortaleza y sabiduría. A Él le debo cada oportunidad, cada logro alcanzado y la perseverancia que me permitió superar los momentos más difíciles. Su amor, guía y presencia constante fueron el pilar que me sostuvo para llegar a cumplir esta meta.

Extiendo mi gratitud a la Universidad de Huánuco por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y adquirir los conocimientos necesarios para desenvolverme en el ámbito de la Ingeniería Ambiental. Agradezco de manera especial a los docentes de la carrera por su dedicación, compromiso y por compartir sus enseñanzas con tanto empeño.

Deseo expresar un reconocimiento especial a mi asesor, Ing. Raúl Cajahuanca Torres, por su valiosa guía, apoyo continuo, paciencia y compromiso durante todo el proceso de elaboración y presentación de mi tesis.

A mis jurados Mg. Simeón Calixto, Mg. Frank Erick Cámara Llanos, Mg. Yasser Vásquez Baca por brindarme sus conocimientos durante mi formación profesional y por su valiosa orientación en el desarrollo de mi trabajo de investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas que contribuyeron, de forma directa o indirecta, al desarrollo de este trabajo de investigación.

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE.....	IV
INDICE DE TABLAS	VI
INDICE DE FIGURAS.....	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	X
INTRODUCCIÓN	XI
CAPÍTULO I.....	13
PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.....	13
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	13
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.2.1 PROBLEMA GENERAL.....	16
1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	16
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	17
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
1.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.7 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN	19
CAPÍTULO II.....	20
MARCO TEÓRICO	20
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
2.1.1 INTERNACIONALES	20
2.1.2 NACIONALES.....	22
2.1.3 LOCALES	23

2.2 BASES TEÓRICAS.....	24
2.3 DEFINICIONES CONCEPTUALES	63
2.4 HIPÓTESIS.....	65
2.4.1 HIPOTESIS GENERAL.....	65
2.4.2 HIPOTESIS ESPECIFICAS	65
2.5 VARIABLES.....	66
2.5.1 VARIABLE INDEPENDIENTE	66
2.5.2 VARIABLE DEPENDIENTE	66
2.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLE	67
CAPÍTULO III.....	68
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	68
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	68
3.1.1 ENFOQUE	68
3.1.2 ALCANCE O NIVEL.....	69
3.1.3 DISEÑO METODOLÓGICO.....	69
3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA	70
3.2.1 POBLACIÓN.....	70
3.2.2 MUESTRA	71
3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	71
3.4 TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	73
CAPÍTULO IV.....	74
RESULTADOS.....	74
4.1 RESULTADOS DESCRIPTIVOS.....	74
REFERENCIAS	91
ANEXOS.....	103

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Marco legal peruano sobre gestión y tratamiento de suelos, organizada por niveles, nacional, sectorial y local	26
Tabla 2 Concentraciones reportadas de Pb y Cd en suelos de Perú (mg/kg).	37
Tabla 3 Estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo	44
Tabla 4 Evaluación del suelo mediante los indicadores e índices.....	47
Tabla 5 Técnicas e equipos de recolección de datos para parámetros biológicos.	51
Tabla 6 Clasificación taxonómica.....	56
Tabla 7 Operacionalización de variable	67
Tabla 8 Ubicación del proyecto.....	70
Tabla 9 Indicadores de recolección de datos.....	71
Tabla 10 Profundidad del muestreo según el uso del suelo.	72
Tabla 11 Análisis de los parámetros físicos del suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.	74
Tabla 12 Análisis de los indicadores químicos de fertilidad y nutrición en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.	76
Tabla 13 Análisis de los indicadores químicos de degradación en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.	77
Tabla 14 Comparación de las concentraciones de metales pesados (cadmio y plomo) en el suelo entre los diferentes tratamientos para determinar la dosis más efectiva.	79
Tabla 15 Prueba de normalidad con Shapiro-Wilk.....	81
Tabla 16 Prueba de hipótesis	82

Tabla 17 Comparación del efecto de la remediación con las diferentes dosis
..... 83

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación gráfica de remediación	27
Figura 2 Clasificaciones de técnicas de remediaciones de suelos afectados	28
Figura 3 Principales fuentes de afectación por elementos pesados.	31
Figura 4 Fases de movilidad de metales.	39
Figura 5 Remediación de las superficies afectadas por minería	43
Figura 6 La naturaleza y los usos de los indicadores ambientales	49
Figura 7 Árbol Alnus acuminata	55
Figura 8 Árbol Alnus acuminata	57
Figura 9 Corteza del árbol Alnus Acuminata.....	58
Figura 10 Composición de hojas.....	59
Figura 11 Las flores masculinas miden 7 cm de largo, son alargadas y pendulares.	60
Figura 12 Los frutos de la especie Alnus acuminata es estacional.	61
Figura 13 Flujograma: Protocolo de ejecución	72
Figura 14 Caracterización de los parámetros físicos del suelo contaminado por metales pesados durante la remediación con diferentes dosis de biochar.	75
Figura 15 Análisis de los indicadores químicos de degradación en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.	78
Figura 16 Evolución de la concentración de metales pesados en el suelo y comparación con ECA	80

RESUMEN

La investigación tuvo como **objetivo** evaluar la capacidad remediadora del biochar obtenido a partir de aliso (*Alnus acuminata*) aplicado en dos dosis (15 % y 30 %) sobre un suelo contaminado con cadmio (Cd) y plomo (Pb). Para ello, se usó como **metodología** el desarrollo de un diseño experimental en el que las muestras de suelo contaminado fueron tratadas con dichas proporciones de biochar y monitoreadas durante cinco meses mediante análisis periódicos de parámetros físicos, químicos y de las concentraciones de metales pesados. Los **resultados** evidenciaron que el suelo presentaba inicialmente concentraciones superiores a los Estándares de Calidad Ambiental, registrándose 1.530 ppm de Cd y 78.380 ppm de Pb. Tras la aplicación del biochar se observó una reducción significativa de ambos metales. Con la dosis de 15 %, el Cd disminuyó a 0.473 ppm (69.1 %) y el Pb a 12.378 ppm (84.2 %). Con la dosis de 30 %, la remoción fue mayor, alcanzando 0.315 ppm de Cd (79.4 %) y 8.457 ppm de Pb (89.2 %), logrando valores finales por debajo de los límites permisibles. Asimismo, se registraron mejoras en la calidad del suelo, como la reducción de la acidez del pH y el incremento de nutrientes como calcio y magnesio. En **conclusión**, la aplicación de biochar mostró una alta eficiencia en la inmovilización de Cd y Pb en suelos contaminados, especialmente a una dosis del 30 %. Además, se evidenció un efecto dual en los indicadores químicos del suelo, con incremento de la conductividad eléctrica dentro de rangos no salinos y disminución del sodio intercambiable, lo que contribuye a mejorar la estabilidad estructural del suelo y reducir el riesgo de sodicidad.

Palabras clave: Biochar, remediación de suelos, metales pesados, plomo, cadmio, *Alnus acuminata*.

ABSTRACT

The research aimed **objective** to evaluate the remediation capacity of biochar obtained from alder (*Alnus acuminata*) applied at two doses (15% and 30%) to soil contaminated with cadmium (Cd) and lead (Pb). The **methodology** consisted of an experimental design in which contaminated soil samples were treated with these proportions of biochar and monitored over a five-month period through periodic analyses of the soil's physical and chemical parameters, as well as the concentrations of heavy metals. The **results** showed that the soil initially had concentrations exceeding the Environmental Quality Standards, with values of 1.530 ppm for Cd and 78.380 ppm for Pb. After the application of biochar, a significant reduction in both metals was observed. With the 15% dose, Cd decreased to 0.473 ppm (69.1%) and Pb to 12.378 ppm (84.2%). With the 30% dose, the removal efficiency was higher, reaching 0.315 ppm for Cd (79.4%) and 8.457 ppm for Pb (89.2%), achieving final values below the permissible limits. Additionally, improvements in soil quality were observed, including a reduction in soil acidity (pH) and an increase in nutrients such as calcium and magnesium. In **conclusion**, the application of biochar demonstrated high efficiency in the immobilization of Cd and Pb in contaminated soils, particularly at the 30% dose. Furthermore, a dual effect was observed in the soil's chemical indicators, with an increase in electrical conductivity within non-saline ranges and a decrease in exchangeable sodium, which contributes to improving soil structural stability and reducing the risk of sodicity.

Keywords: Biochar, Soil remediation, Heavy metals, Lead, Cadmium, *Alnus acuminata*.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de los suelos con metales pesados, como el plomo (Pb) y el cadmio (Cd), representa uno de los problemas ambientales más críticos a nivel global. Esta situación se origina principalmente en actividades industriales y mineras, las cuales liberan estos elementos tóxicos al ambiente. Como consecuencia, se produce una notable disminución de la productividad agrícola, un deterioro progresivo de los ecosistemas y, lo más preocupante, un riesgo directo para la salud humana, ya que estos metales pueden ingresar fácilmente a la cadena alimentaria a través de los cultivos. (Vácha, 2021; Singh et al., 2025).

En el Perú, especialmente en zonas con antecedentes de dichas actividades, las remediaciones de los suelos deteriorados se ha vuelto una prioridad esencial para garantizar la sostenibilidad ambiental y el desarrollo seguro. En 2024, la empresa pública Activos Mineros SAC (AMSAC) ejecutó 185,9 millones de soles en proyectos de rehabilitación de suelos contaminados, superando la meta de 149,1 millones de soles planificada inicialmente (Editora Perú, 2025).

En la ciudad de Cajamarca, se realizó la ejecución de un proyecto de remediaciones de los suelos agrícolas afectados por hidrocarburos que mostraba los suelos afectados de ~14 130 m³ con concentración inicial de 2108 mg/kg de hidrocarburos en fracción F2 (hidrocarburos considerados de rango intermedio). F3 (Hidrocarburos pesados). El tratamiento aplicado bacterias autóctonas mediante aireación, (Landfarming) alcanzó eficiencias de remediación que superan el 91 % para F2 y 99,5 % para F3, reduciendo los niveles de contaminación hasta por debajo de los estándares ambientales establecidos, tras alrededor de 3 meses de tratamiento (P. R. Wilfredo, 2023).

En 2025, el Ministerio del Ambiente (Minam) del Perú comenzó a aplicar tecnologías locales para recuperar 250 hectáreas de suelos contaminados por minería ilegal especialmente por metales pesados como el mercurio en regiones como Madre de Dios (ProActivo, 2025).

El suelo constituye uno de los elementos esenciales del ambiente, donde se forma complejamente con la interacción de minerales, agua, aire, materia orgánica y una gran diversidad de macro y microorganismos. Donde se desarrolla algunos procesos continuos de carácter biótico y abiótico que permiten el equilibrio de los ecosistemas y el sostenimiento de la vida en el planeta (Lal, 2016).

A pesar de su relevancia ecológica y social, en los últimos años el suelo ha sido sometido a un uso inadecuado e insostenible debido a diversas actividades humanas, donde se genera una preocupación creciente por la presencia de contaminantes ambientales y el progresivo deterioro de este recurso natural.

La degradación del suelo se ha intensificado con el paso del tiempo, provocando efectos negativos no solo en los ecosistemas, sino también en los organismos y comunidades que dependen de él. Esta situación representa significativa una amenaza para el ambiente y plantea una importante tarea en materia de gestión ambiental. En muchos casos, la degradación y pérdida de estos suelos resulta irreversible, a menos que se implementen tratamientos y estrategias adecuadas que permitan mitigar o revertir este proceso. (Kogut, 2025)

En ese sentido, esta investigación tiene como finalidad principal analizar la capacidad remediadora de distintas dosis de biochar obtenido a partir del Aliso andino (*Alnus acuminata*) sobre suelos afectados por contaminación con metales pesados (Cadmio y Plomo), busca aportar evidencia científica rigurosa sobre una solución de bajo costo y ambientalmente sostenible para un problema local relevante.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El suelo es uno de los recursos naturales más relevantes para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y el desarrollo de las actividades humanas. En él se integran componentes minerales, agua, aire, materia orgánica y una gran diversidad de organismos vivos que interactúan continuamente mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Estas interacciones permiten que el suelo cumpla funciones esenciales como el soporte de la producción agrícola, la regulación del ciclo del agua y la conservación de la diversidad biológica, aspectos fundamentales para el equilibrio ambiental y la sostenibilidad de los sistemas productivos (FAO, 2015; MINAM, 2020).

En las últimas décadas, diversos estudios han advertido que este recurso enfrenta un deterioro progresivo a nivel mundial. Informes internacionales indican que una superficie considerable de suelos presenta distintos niveles de degradación. El Organismo Internacional de Energía Atómica estima que aproximadamente 1.900 millones de hectáreas del planeta muestran signos de deterioro, lo que representa una proporción importante de los suelos disponibles para la producción y el mantenimiento de los ecosistemas.

Dentro de los procesos responsables de esta problemática, la erosión es considerada el factor más significativo, ya que explica una gran parte de la pérdida de suelo fértil. Como consecuencia, millones de personas dependen de sistemas agrícolas que se desarrollan en suelos con algún grado de degradación, lo que genera preocupación respecto a la seguridad alimentaria y a la sostenibilidad de los sistemas productivos. Asimismo, se estima que cada año se pierden más de 36.000 millones de toneladas de suelo fértil a escala global como

resultado de procesos erosivos y prácticas inadecuadas de manejo del territorio (IAEA, 2026).

La preocupación por la conservación del suelo también se relaciona con el hecho de que su formación ocurre mediante procesos extremadamente lentos. A diferencia de otros recursos naturales, su regeneración puede requerir largos periodos de tiempo, por lo que su pérdida o deterioro resulta difícil de revertir. En ese sentido, organismos internacionales han destacado la necesidad de implementar estrategias de manejo sostenible orientadas a preservar las funciones ecológicas del suelo, asegurar la producción de alimentos y proteger los recursos hídricos que dependen directamente de este sistema natural (FAO, 2015).

En el Perú, la problemática asociada a la degradación del suelo ha generado un creciente interés por parte de las instituciones encargadas de la gestión ambiental. Diversas entidades han promovido iniciativas orientadas a la restauración de áreas afectadas mediante programas de reforestación, recuperación de ecosistemas y promoción de sistemas agroforestales. Estas acciones se han desarrollado en diferentes regiones del país, incluyendo zonas de la región Huánuco, donde se busca recuperar áreas degradadas y fortalecer la resiliencia de los ecosistemas frente a fenómenos como el cambio climático y la pérdida de cobertura vegetal. Asimismo, estas iniciativas resaltan la importancia de conservar ecorregiones estratégicas como las Yungas, consideradas de alto valor ecológico (SERFOR, 2025).

No obstante, además de los procesos de degradación asociados a la deforestación y a la erosión, existen otras actividades que pueden afectar la calidad del suelo. Entre ellas destacan la minería, las actividades de refinación y el transporte de hidrocarburos, las cuales forman parte de sectores importantes para el crecimiento económico del país. Sin embargo, cuando estas actividades no se desarrollan bajo adecuados criterios de gestión ambiental, pueden generar impactos negativos sobre el entorno natural, afectando tanto los ecosistemas

como las condiciones de vida de las poblaciones cercanas (Serrano, 2019).

La calidad del suelo resulta especialmente importante en territorios donde las actividades agrícolas constituyen la principal base económica de las comunidades locales. En muchas zonas rurales, la disponibilidad de alimentos y el sustento de las familias dependen directamente de la fertilidad y productividad del suelo. Sin embargo, factores como la expansión de áreas urbanas, el uso intensivo de insumos químicos y el manejo inadecuado del territorio han incrementado la presión sobre este recurso. Estas condiciones han favorecido procesos de deterioro como la pérdida de materia orgánica, la erosión y la disminución de la fertilidad natural del suelo.

En regiones como Huánuco, esta situación repercute directamente en la productividad agrícola y en la disponibilidad de alimentos para la población (Fabian, 2022). Frente a esta problemática, la investigación científica ha buscado desarrollar alternativas que permitan recuperar suelos degradados o contaminados mediante métodos ambientalmente sostenibles. Una de las estrategias que ha despertado mayor interés es el uso de biochar, un material carbonoso obtenido a partir de la transformación térmica de biomasa orgánica en condiciones controladas. Este material presenta propiedades que pueden contribuir a mejorar la estructura del suelo, incrementar su capacidad de retención de nutrientes y favorecer la reducción de ciertos contaminantes presentes en el ambiente.

Entre las materias primas utilizadas para producir biochar se encuentra el aliso andino (*Alnus acuminata*), especie ampliamente distribuida en zonas altoandinas y reconocida por su capacidad para mejorar las condiciones del suelo en sistemas agroforestales. Investigaciones recientes sugieren que el biochar obtenido a partir de esta especie puede contribuir a la recuperación de suelos afectados por contaminantes, particularmente metales pesados como el cadmio (Cd) y el plomo (Pb), los cuales representan una preocupación ambiental

debido a su persistencia y a su potencial acumulación en los sistemas agrícolas.

En este contexto, resulta pertinente evaluar alternativas que permitan mejorar la calidad de suelos afectados por contaminación y contribuir a su recuperación. Por ello, la presente investigación titulada “Comparación del efecto remediador de diferentes dosis de biochar de aliso (*Alnus acuminata*) sobre la calidad del suelo contaminado por metales pesados” tiene como propósito analizar la influencia de distintas dosis de biochar aplicado a suelos contaminados con cadmio y plomo, con el fin de determinar su capacidad para mejorar las propiedades del suelo y reducir la presencia de estos contaminantes.

A través de este estudio se busca aportar información científica que contribuya al desarrollo de estrategias sostenibles para la recuperación de suelos y la protección de los sistemas productivos locales.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 PROBLEMA GENERAL

¿Cuál es el efecto remediador de diferentes dosis de biochar de aliso en la calidad del suelo contaminado por metales pesados?

1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS

¿Cuál es el efecto de los parámetros físicos del suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar?

¿Cuáles son los efectos de los indicadores químicos de fertilidad y nutrición del suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar?

¿Cuál es el efecto de los indicadores químicos de degradación del suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar?

¿Cuál es la concentración de metales pesados (cadmio y plomo) en el suelo antes y después de la aplicación de las diferentes dosis de biochar?

1.3 OBJETIVO GENERAL

Demostrar el efecto remediador de diferentes dosis de biochar de aliso en la calidad del suelo contaminado por metales pesados.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar el efecto de los parámetros físicos del suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.

Explicar el efecto de los indicadores químicos de fertilidad y nutrición en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.

Evaluar el efecto de los indicadores químicos de degradación en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.

Comparar la concentración de metales pesados (cadmio y plomo) en el suelo antes y después de la aplicación de las diferentes dosis de biochar.

1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Actualmente conocemos del dificultoso problema que causa la degradación de suelo en el ambiente, esto es debido al ritmo degenerativo actual, está amenazando las capacidades que tienen para que las generaciones del futuro satisfagan sus necesidades, al no tener una

solución rápida la salud del suelo empeorará a tal punto que no nos podrá proporcionar sus recursos que son vitales para el progreso de vida.

En los últimos años se efectuaron distintas investigaciones sobre algunos tipos de enmiendas orgánicas que consiguen ayudar a perfeccionar las propiedades del suelo degradado por metales pesados, en estas destaca el Carbón Activo o también conocido como Carbón Vegetal, por lo cual abriría el campo a distintas medidas para preservar esta problemática. Para el análisis se usará diferentes dosis de biochar de aliso y se comparará su efecto remediador en el transcurso de mejoramiento de sus propiedades físico-químicas y biológicas.

El resultado obtenido en la investigación ayudó a evidenciar cuál de las dos dosis de Biochar de aliso es el mejor para la remediación de suelos encontrando así una estrategia para controlar esta problemática. El estudio fue desarrollado con el fin de culminar mi formación universitaria con éxito y lograr el objetivo de conseguir mi título profesional con la sustentación y la posterior aprobación de este proyecto de investigación.

1.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio cuenta con las siguientes limitaciones:

El estudio se centró en la evaluación de los parámetros fisicoquímicos del suelo. Aunque la calidad del suelo también comprende una dimensión biológica (actividad microbiana, meso y macrofauna), esta no fue parte del alcance de la presente investigación.

La evaluación del efecto remediador se limitó a la comparación de dos dosis de tratamiento (15% y 30%), no se exploraron otras posibles dosificaciones que podrían existir entre o fuera de este rango.

La investigación se llevó a cabo en condiciones de un entorno natural, el suelo contiene una amplia variedad de microorganismos,

lombrices y otros organismos que pueden alterar la estructura y las propiedades del biochar. Estas interacciones podrían aumentar o reducir su capacidad para retener nutrientes o inmovilizar contaminantes, en contraste con las condiciones más controladas y estables que se presentan en un invernadero.

El periodo de evaluación del estudio fue de cinco meses. Aunque este tiempo fue suficiente para observar cambios significativos e inmediatos, la estabilidad a largo plazo del efecto remediador particularmente la inmovilización de los metales pesados no fue evaluada. No es posible determinar con certeza si las condiciones de remediación se mantendrán de forma indefinida en el tiempo.

1.7 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

Los componentes necesarios para el desarrollo de la investigación son sencillos de hallar y tienen un precio razonable. El Aliso es una especie maderable, es muy sencillo de encontrar ya que se encuentra una gran cantidad en las montañas de Santa María del Valle, por ende, no tendré impedimento al buscarlo. Para la obtención del suelo contaminado y la mezcla con la dosis del biochar se tiene un determinado lugar. No se requiere un laboratorio, por tanto, se tiene que crear un lugar libre para la realización del proyecto, no demanda mucho espacio ni inversión. La demora para obtener el Biochar es de acuerdo a la técnica de pirolisis a utilizar, en este caso fue la rápida. El estudio no tuvo problemas en temas de afectación ambiental conllevado por el proyecto, dado a que se realizó de la manera más objetiva utilizando todo el biochar obtenido.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 INTERNACIONALES

Quiroz (2021), en el artículo titulado “*El efecto del carbón vegetal, micorrizas arbusculares y Guazuma ulmifolia en la rehabilitación de suelos mineros*”, desarrollado en Colombia y publicado en la revista científica **Tierra Latinoamericana**, tuvo como **objetivo** analizar los procesos iniciales de recuperación de suelos afectados por actividades de minería ilegal, considerando variables físicas, químicas y microbiológicas del suelo. Para alcanzar este propósito, la **metodología** incluyó la selección de cinco puntos de muestreo mediante criterio de juicio, recolectándose muestras de suelo hasta aproximadamente 20 cm de profundidad, las cuales posteriormente fueron secadas, molidas y tamizadas en laboratorio para su análisis. Los **resultados** evidenciaron que la germinación de *Guazuma ulmifolia* presentó variaciones dependiendo de la dosis de biochar aplicada, alcanzándose porcentajes elevados de germinación en suelos clasificados como entisoles cuando se emplearon bajas concentraciones del material. Asimismo, se identificaron diferencias en el crecimiento radicular y en las propiedades edáficas del suelo. El estudio **concluyó** que el uso combinado de biochar y microorganismos formadores de micorrizas favorece los procesos de rehabilitación de suelos degradados, mejorando sus propiedades fisicoquímicas y contribuyendo a la recuperación de áreas afectadas por minería.

Ramírez (2023), en el artículo denominado “*Aplicación de biocarbón como estrategia de remediación de suelos contaminados por hidrocarburos*”, publicado en la revista **Gestión y Ambiente** en Bogotá, planteó como **objetivo** examinar el potencial del biocarbón como alternativa para la recuperación de

suelos afectados por hidrocarburos. Para ello, la **metodología** consistió en una revisión documental basada en literatura científica obtenida de bases de datos académicas como Scopus, Google Scholar, Springer Link y ScienceDirect, analizando estudios relacionados con las propiedades del biochar y su aplicación en procesos de remediación ambiental. Los **resultados** indicaron que el biochar se obtiene mediante pirólisis, proceso térmico que descompone biomasa orgánica —como residuos agrícolas o forestales— a temperaturas entre 250 °C y 850 °C en ausencia o limitada presencia de oxígeno, siendo su eficiencia dependiente de la composición y calidad de la biomasa utilizada. El estudio **concluyó** que el biochar puede actuar como un agente bioestimulante que mejora la actividad microbiana del suelo, favoreciendo la adaptación de microorganismos y contribuyendo a la degradación de contaminantes presentes en el ambiente edáfico.

Barrios (2024), en la tesis titulada *“Elaboración de biochar a base de restos vegetales orgánicos para el tratamiento del suelo de uso agrícola”*, desarrollada en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en Ecuador, tuvo como **objetivo** evaluar la producción de biochar a partir de residuos vegetales y analizar su influencia en la recuperación de suelos degradados y en el crecimiento del cultivo de col (*Brassica oleracea*). En cuanto a la **metodología**, la investigación utilizó cáscara de coco como materia prima para la producción de biochar debido a su alto contenido de lignina y celulosa, estableciéndose cuatro tratamientos basados en una mezcla compuesta por biochar y abono orgánico. Los **resultados** mostraron mejoras en las características fisicoquímicas del suelo, destacándose incrementos en materia orgánica, disponibilidad de nutrientes, actividad microbiana y capacidad de intercambio catiónico. La investigación **concluyó** que el biochar representa una alternativa sostenible para mejorar la calidad del suelo y puede emplearse

como herramienta en procesos de remediación ambiental y manejo de suelos agrícolas.

2.1.2 NACIONALES

Gómez (2021), en la tesis titulada “*Aplicaciones de biocarbón para la inmovilización de plomo en suelos provenientes del relave minero Paredones*”, desarrollada en la Universidad Privada Antonio Guillermo Urrello en Cajamarca, tuvo como **objetivo** evaluar el grado de inmovilización del plomo en suelos contaminados mediante la aplicación de biochar elaborado a partir de *Eucalyptus globulus*. La **metodología** consistió en aplicar diferentes porcentajes de biocarbón (5 %, 10 %, 15 % y 20 %) en muestras de suelo contaminado, realizando evaluaciones a los 30 y 60 días y utilizando *Lactuca sativa* como especie indicadora para observar los efectos del tratamiento. Los **resultados** evidenciaron una disminución considerable en la concentración de plomo presente en el suelo, registrándose reducciones importantes cuando se aplicaron dosis más altas de biochar. El estudio **concluyó** que las concentraciones cercanas al 15 % y 20 % de biocarbón mostraron mayor eficiencia en la reducción de la movilidad del plomo en suelos contaminados por relaves mineros.

Guevara et al. (2023), en la tesis titulada “*Aplicación del biocarbón-compost en la fitorremediación de arsénico y plomo usando Zea mays en suelos contaminados con relaves mineros*”, desarrollada en la Universidad Nacional del Callao, tuvo como **objetivo** analizar el efecto de la combinación de biocarbón y compost en la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados utilizando maíz (*Zea mays*) como especie vegetal indicadora. Para ello, la **metodología** incluyó la producción de biocarbón a partir de madera de pino mediante pirólisis a diferentes temperaturas, así como la elaboración de compost a partir de residuos orgánicos, evaluándose posteriormente sus características fisicoquímicas antes de su

aplicación en suelos contaminados con relaves mineros. Los **resultados** mostraron que la dosis aplicada del biocarbón-compost influyó significativamente en la capacidad de absorción y acumulación de metales por parte del cultivo evaluado. El estudio **concluyó** que la dosificación del biocarbón-compost constituye un factor determinante en los procesos de fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados.

2.1.3 LOCALES

Guerrero (2021), en la tesis titulada *“Efecto del biocarbón obtenido a partir de biomasa residual agrícola en la inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio”*, desarrollada en la Universidad Nacional Agraria de la Selva en Tingo María, estableció como **objetivo** caracterizar el biocarbón obtenido de residuos agrícolas como cáscara de cacao, cascarilla de café y cascarilla de arroz, además de evaluar su influencia en el crecimiento de plantas de cacao y en la reducción de cadmio presente en el suelo. En relación con la **metodología**, las muestras de biomasa residual fueron recolectadas y procesadas en laboratorio para su transformación en biocarbón, el cual posteriormente fue aplicado en diferentes dosis en suelos contaminados para evaluar su efecto en variables agronómicas de las plantas. Los **resultados** evidenciaron incrementos en el peso fresco de las plantas y mejoras en su desarrollo vegetativo, observándose diferencias estadísticas entre las dosis evaluadas. La investigación **concluyó** que la aplicación de biocarbón, particularmente en dosis cercanas al 15 %, puede favorecer el crecimiento de las plantas y contribuir a la reducción de contaminantes presentes en el suelo.

Ramos (2022), en la tesis titulada *“Efectos del biocarbón de molle (*Schinus molle* L.) en la recuperación del suelo afectado utilizando maíz (*Zea mays* L.) como indicador”*, desarrollada en la Universidad de Huánuco, tuvo como **objetivo** evaluar el efecto del biochar obtenido de molle en la recuperación de suelos

degradados y en el crecimiento del cultivo de maíz. La **metodología** se desarrolló mediante un experimento en macetas que contenían suelo contaminado, aplicándose diferentes dosis de biochar (5 %, 15 % y 30 %) con varias repeticiones por tratamiento, sembrándose posteriormente plantas de maíz previamente germinadas y evaluándose su desarrollo durante aproximadamente 60 días. Los **resultados** mostraron que el biochar contribuyó a mejorar algunas propiedades químicas del suelo, especialmente el pH, además de favorecer el crecimiento del cultivo utilizado como indicador. El estudio **concluyó** que el biochar obtenido de molle puede contribuir a la recuperación de suelos degradados, ya que mejora las condiciones del suelo y favorece el desarrollo de las plantas.

2.2 BASES TEÓRICAS

La remediación es la colección de tratamientos y actividades generales de compensación dirigido a restaurar el medioambiente después de los impactos negativos ambientales o daño al medio ambiente causado por el desarrollo de actividades, trabajos, o económicamente o productivamente orientados a proyectos. una colección de medidas y actividades eso son parte de una compensación general, un plan dirigido para dar marcha atrás a los impactos negativos ambientales desarrollados, efectos o daño a la naturaleza (MINAM, 2015).

Normativa peruana relacionada con la calidad del suelo

El Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM establece los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo, los cuales constituyen valores de referencia que permiten evaluar el estado de contaminación del suelo. Dichos estándares consideran distintos parámetros y se aplican según el tipo de uso del suelo, tales como agrícola, residencial o industrial, con la finalidad de determinar si la presencia de contaminantes puede representar riesgos para la salud

humana o para el ambiente. Asimismo, la Ley General del Ambiente reconoce como principio fundamental el derecho de toda persona a desarrollarse en un ambiente sano, equilibrado y adecuado para el bienestar y desarrollo de la vida. Dentro de esta normativa también se establece el principio de prevención, el cual señala que la gestión ambiental debe priorizar acciones orientadas a evitar o reducir la degradación del entorno natural. De igual manera, la legislación ambiental contempla el principio de internalización de costos, mediante el cual se establece que cualquier persona natural o jurídica, ya sea pública o privada, debe asumir la responsabilidad económica por los impactos o daños ambientales que pueda generar en el ejercicio de sus actividades.

Además, los Estándares de Calidad Ambiental para Suelo cumplen una función preventiva y correctiva dentro de la gestión ambiental, debido a que permiten identificar si un suelo presenta concentraciones de sustancias químicas por encima de los valores permitidos. En ese sentido, el Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM precisa que los ECA para suelo constituyen un referente obligatorio para el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental, especialmente en actividades productivas, extractivas y de servicios. Por ello, su aplicación resulta importante en proyectos donde existe riesgo de alteración del suelo por residuos sólidos, hidrocarburos, metales pesados, sustancias químicas u otros agentes contaminantes. De esta manera, la normativa no solo permite evaluar la calidad actual del suelo, sino también orientar medidas de prevención, control, remediación o recuperación de áreas afectadas, contribuyendo a reducir los impactos negativos sobre el ambiente y la salud de la población (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017).

Tabla 1

Marco legal peruano sobre gestión y tratamiento de suelos, organizada por niveles, nacional, sectorial y local

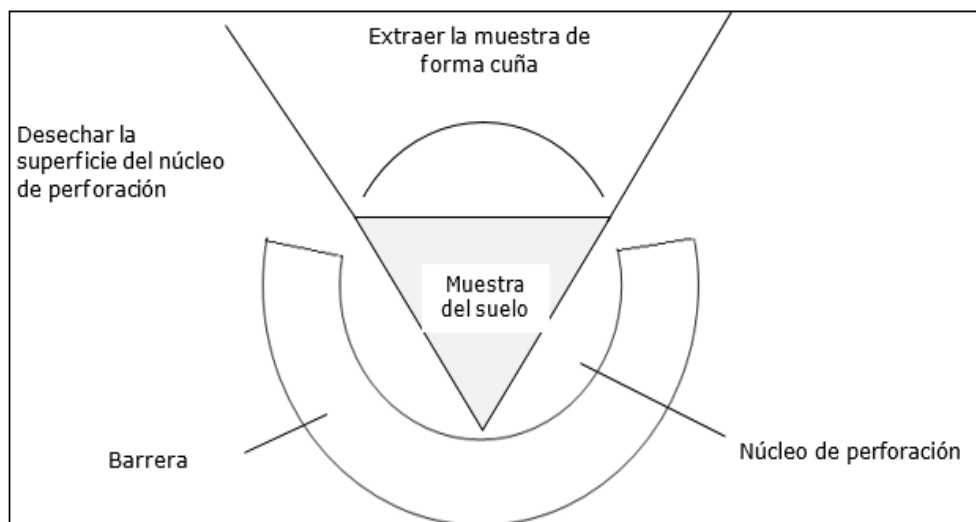
Nivel	Norma/ Instrumento	Año	Alcance	Instituciones Competentes
Nacional	Ley N° 28611	2005	Establece los principios, derechos y obligaciones para la gestión ambiental en el Perú.	Ministerio del Ambiente (MINAM); Consejo Nacional del Ambiente (actualmente MINAM); Gobiernos Regionales y Locales
Nacional	Ley N° 28245	2004	Crea el Sistema Nacional de Gestión Ambiental (SNGA), define la articulación de la competencia ambiental en los niveles de gobierno.	MINAM (ente rector del SNGA); entidades sectoriales; gobiernos regionales y municipales
Nacional	Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM	2017	Aprueba los Estándares de Calidad (ECA) para el suelo, definiendo	MINAM; OEFA (supervisión y fiscalización); autoridades sectoriales competentes
Nacional	Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM	2013	Estableció parámetros iniciales de calidad ambiental para suelos.	MINAM
Sectorial	Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM	2017	Establece criterios para la gestión de sitios contaminados.	MINAM; OEFA; titulares de actividades productivas
Sectorial (Agrario)	Ley N° 29338	2009	Regula el uso y gestión de recursos hídricos; tiene implicancia indirecta	Autoridad Nacional del Agua (ANA); MIDAGRI
Local/ Regional	Ley N° 27972	2003	Ordenamiento territorial y control de actividades que impacten el suelo.	Municipalidades Provinciales y Distritales
Local/ Regional	Ley N° 27867	2002	Otorga competencias ambientales a gobiernos regionales, incluyendo formulación de políticas y fiscalización ambiental regional.	Gobiernos Regionales; Gerencias Regionales de Recursos Naturales y Gestión Ambiental

Nota. Muestra la síntesis del Marco legal de tratamiento de suelos (D.S. N° 011-2017-MINAM; D.S. N° 002-2014-MINAM).

La remediación de tierras es un método de reparación y descontaminación de tierras, el proceso de eliminación de contaminantes para preservar el medio ambiente y la salud pública. El propósito de los procesos es la restauración de la superficie a su situación virgen (natural) y liberarlo de contaminantes nos indica (Coria, 2015).

Figura 1

Representación gráfica de remediación



Nota. Toma de muestras de un núcleo de perforación, Febres (2019).

Tecnologías de restauración de las superficies polucionadas

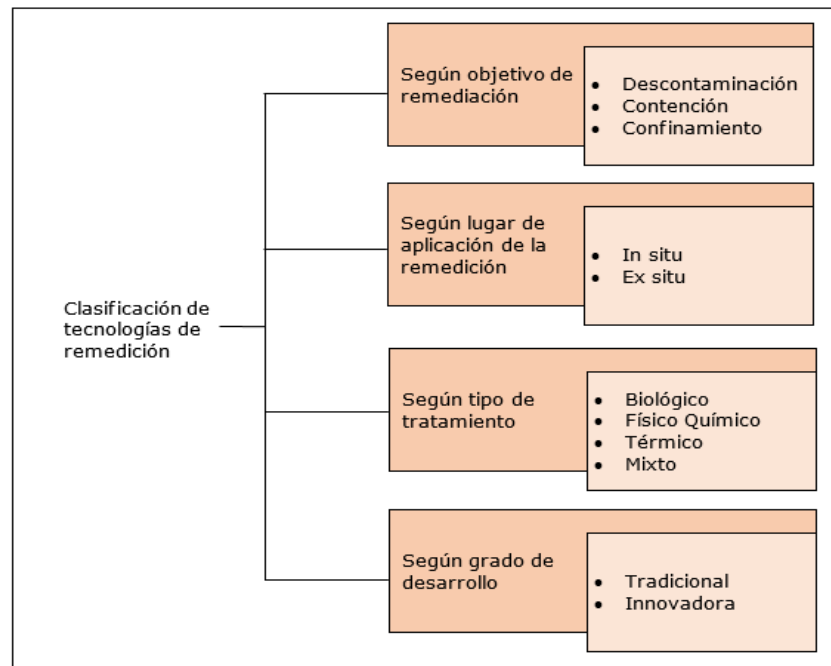
Para disponer un amplio rango de tecnologías que están disponibles para las remediaciones de los suelos contaminados con metales pesados; un poco de estas tecnologías son en común usar, mientras otros se encuentran todavía en el experimental escenario, algunos de ellos son destinado a aislar o quitar contaminantes por transformar sus químicos o estructuras a través de procesos generales físico, químico, o biológico (Díaz, 2008).

El autor citado agregó que las técnicas de restauración son diferentes y se pueden clasificar según diferentes criterios: el propósito de la restauración, la aplicación del proceso de restauración y el tipo de procesamiento utilizados. Asimismo, cuentan con algunas perspectivas

mencionadas anteriormente, también se puede clasificar según el grado de desarrollo tecnológico (Alcaino, 2012)

Figura 2

Clasificaciones de técnicas de remediaciones de suelos afectados.



Nota. Obtenido de Alcaino (2012).

El autor nos indica que, por lo general, los métodos de restauración de superficies de rehabilitación de aguas subterráneas y del suelo cubren todas las acciones destinadas a disminuir su toxicidad, movibilidades o concentraciones de contaminantes en el ambiente por medio del cambio químico, físico o químico de la composición de sustancias peligrosas o del medio ambiente. La elección de cada técnica es dependiente a las propiedades de los suelos y de los contaminantes, la eficiencia prevista, desde luego, la viabilidad económica tecnológica y el tiempo necesitado para la implementación (Alcaino, 2012).

Contaminación del Suelo

El autor hace énfasis en el concepto de polución de los suelos se refieren a las presencias de sustrato químicas o sustrato inapropiadas

en el suelo y/o en concentraciones superiores a las normales que afectan negativamente a cualquiera de los seres inapropiados. La afectación de los suelos frecuentemente no se pueden realizar la medición de manera directa ni se puede detectar visualmente, lo que convierte en un problema oculto (Rodríguez, 2019).

Según la definición a los contaminantes como aquellos cuyas concentraciones están persistentemente por encima de lo normal (anormal) y que suelen tener un efecto negativo sobre determinados organismos. Puede ser de origen geográfico o humano. El primero puede tener su origen en el lecho rocoso que forman los suelos, las actividades volcánicas o la lixiviación mineralizada. En cambio, los desechos artificiales se producen a partir de desechos peligrosos generados en la industria, la agricultura, la minería, etc. y desechos sólidos urbanos. A partir de la vista legal, los contaminantes que son producidos por las actividades humanas son contaminantes reales que afectan al ambiente (Galán, 2008).

Según el concepto que nos muestra el autor de igual forma la degradación del suelo se puede definir como la pérdida o el debilitamiento de las propiedades materiales debido a la erosión; la pintura o el color de este suelo se deteriora debido al calor, la humedad, la luz solar o la erosión que se da de forma natural. La interacción entre una sustancia y su entorno se puede dividir en interacción física e interacción química que se dan entre los distintos componentes de los suelos (Companies, 2019).

Suelos contaminados por metales pesados

Según nos dice que la minería al ser una actividad altamente perturbada, puede causar problemas serios por las erosiones y las sedimentaciones que derivan de las grandes exposiciones a grandes cantidades de tierra, suelo desnudo o material granular sin estructura o protección (que a menudo consiste en pendientes pronunciadas). Los desiertos desnudos tienden a estar más fragmentados, más

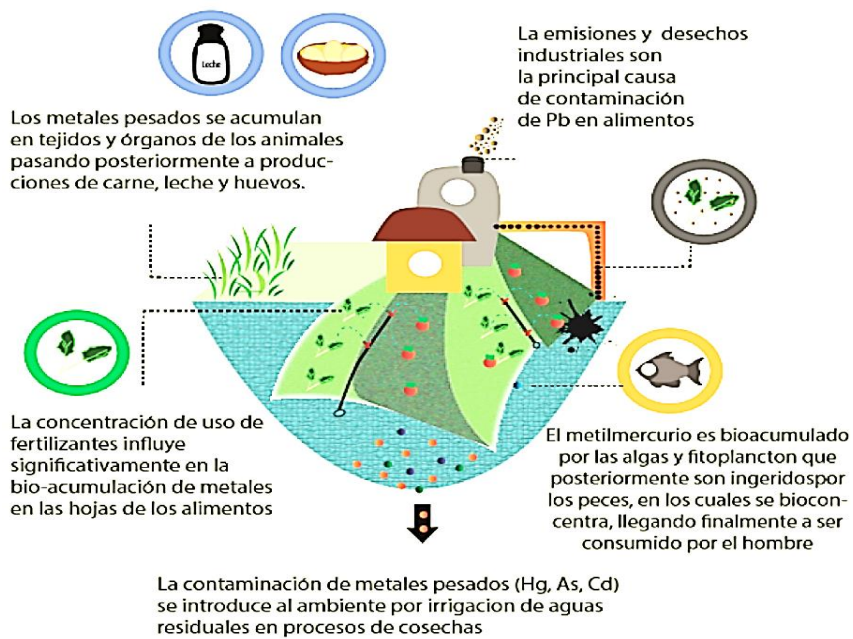
compactos, más propensos a la erosión y menos protegidos por la cubierta vegetal que los paisajes intactos (González, 2011).

La contaminación del suelo con hidrocarburos es una incertidumbre mundial que se ha incrementado de manera dramática en los últimos tres años, provocando cambios en el medioambiente y perjudicando a las poblaciones que consumen los alimentos que produce. Cabe recalcar que el mayor impacto sobre el suelo suele ser utilizado en la agricultura, ya que su manejo de residuos en la minería, la minería ilegal, los crecimientos y desarrollos del sector industrial y los factores económicos son más importantes que los factores ambientales (Liu, 2018, p. 2).

Desde la Revolución Industrial grandes cantidades de metales han ingresado al medio ambiente del resultado como la intensificación de industrias como la minería, la metalurgia y la agricultura (Beltrán & Gómez, 2016). motivo, numerosos estudios que se han publicado sobre las concentraciones de metal pesado en las plantas, animales, peces y pájaros se han centrado en cómo estos metales se acumulan con el tiempo y aumentan con el tiempo. Esto se debe a que la mayoría de estos elementos no pueden biodegradarse porque carecen de la función metabólica específica (Prieto et al., 2009). La contaminación del suelo se produce cuando ciertos elementos químicos o compuestos se encuentran presentes en concentraciones superiores a las que normalmente se registran de forma natural en el ambiente. Este incremento anómalo de sustancias, consideradas contaminantes, constituye una forma particular de degradación del suelo, ya que puede generar efectos perjudiciales sobre los organismos que habitan en él o que dependen de este recurso para su desarrollo (Segovia, 2014).

Figura 3

Principales fuentes de afectación por elementos pesados.



Nota. Contaminación por metal pesado según Segovia, (2014).

Se elaboran referencias en los términos de elementos metálicos y los metaloides donde tienen la característica por poseer la densidad relativa en una toxicidad alta en las concentraciones más bajas ya que no poseen funciones de biología específico por el caso de la biodegradación y las acumulaciones a los organismos. Algunos de estas sustancias son mencionados: As, Ag, Zn, Cd, Hg, Pb, Ni, Cr (Prieto et al, 2009).

Plomo (Pb)

El plomo es un metal pesado ampliamente distribuido en la naturaleza y también generado por actividades humanas, uno de sus principales orígenes antropogénicos son la minería, fundición de minerales de plomo y otros metales, como también tenemos en las industrias de baterías de plomo-ácido (automotriz y de respaldo), que genera emisiones de Pb al aire, suelo y agua, la descarga de residuos sólidos, y escorrentía urbana e industrial, son actividades que liberan Pb persistente que no se degrada en el ambiente y acumula en suelo y

agua, aumentando la exposición ambiental (Pincay P. & Carrasco, 2025)

Usos y beneficios

El plomo es ampliamente utilizado en la fabricación de baterías, componentes eléctricos, protección contra radiación y diversos procesos industriales, desde que se descubrió su toxicidad, se ha dejado de utilizar el plomo en una serie de productos: Tubos (incluidas las soldaduras), pinturas y esmaltes, insecticidas, tintes para el pelo y aditivos para gasolina

Las baterías de plomo (LAB) siguen siendo una de las tecnologías de almacenamiento de energía más utilizadas a nivel mundial, especialmente en el sector de la automoción y en sistemas de respaldo. Sin embargo, su uso es una fuente importante de contaminación por plomo y ácido sulfúrico, con impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud humana, históricamente el Pb se ha utilizado en protección contra radiación en instalaciones médicas, pesos y contrapesos industriales, industria de pigmentos y soldaduras, aunque muchos usos han disminuido por normas ambientales, estos usos han sido valiosos industrialmente y económicamente, pero su potencial contaminante es alto (Cordis, 2019).

Para alcanzar los objetivos de sostenibilidad de la Unión Europea dentro del marco Energía limpia para todos los europeos ante el aumento masivo en la demanda de almacenamiento energético para 2030, las baterías de plomo (LAB) son un complemento indispensable para otras tecnologías gracias a su fiabilidad, bajo coste y seguridad probada. Un punto central es la superioridad ecológica de este sistema, subrayando que su tasa de reciclaje del 99 % lo convierte en el estándar de oro de la economía circular. Se resalta que la innovación continua permitirá que estas baterías sigan dominando sectores críticos como las telecomunicaciones y el respaldo eléctrico, facilitando así una transición energética eficiente y climáticamente neutra (Cordis, 2019)

Impactos Ambientales

En los suelos se encuentra de forma natural el plomo en cantidad mínimas y permisibles, pero la contaminación de este es a consecuencia de actividades antropogénicas. Las actividades de minería, fundición, refinación y combustión de carbón han provocado una contaminación generalizada del suelo, la gasolina con plomo y la pintura también son fuentes importantes de contaminación del suelo (NAP, 2024).

El plomo como contaminante es considerado uno de los metales pesados más frecuentes y comunes del suelo en todo el mundo, el suelo contaminado provoca riesgos importantes para los ecosistemas y la salud humana, además de reducir el rendimiento de los cultivos, poniendo en peligro la calidad del agua y la seguridad alimentaria debido a la bioacumulación en los animales de granja. La contaminación por metales tóxicos puede persistir durante décadas una vez que la contaminación se ha introducido en el suelo. (Campbell, 2025)

Impactos a la Salud

Muchos metales pesados y metaloides pueden ser tóxicos para los seres humanos y el medio ambiente, dependiendo de las vías de exposición, las concentraciones y la biodisponibilidad. El plomo se clasifica como una de las principales sustancias que se encuentran en los sitios prioritarios nacionales y que se determina que representan la amenaza potencial más importante para la salud humana debido a su toxicidad conocida o sospechada y su potencial de exposición humana (NAP, 2024).

La toxicidad del plomo es un problema omnipresente ya que sus efectos sobre la salud son innumerables e incluso pueden provocar la mortalidad de las personas expuestas.

Su vía de exposición puede ser por ingestión, inhalación o absorción dérmica, a través del consumo de alimentos contaminados como verduras y frutas, que aportan la mayoría de los elementos nutricionales importantes para el cuerpo humano, los metales tóxicos pueden entrar en el organismo y provocar dificultades crónicas a largo plazo tras el consumo de dosis incluso bajas de elementos tóxicos como el cadmio y el plomo (Bouida et al., 2022).

Cadmio (Cd)

El cadmio (Cd) es un importante tóxico ambiental e industrial que tiene una vida media muy larga, que oscila entre 10 y 35 años. Es un veneno multiorgánico y multisistémico que migra activamente a través de los sistemas suelo-planta. Con el desarrollo de la producción industrial y agrícola, el contenido de Cd en el medio ambiente aumenta año tras año. Según las estadísticas, aproximadamente 22.000 toneladas de Cd ingresan al suelo a nivel mundial cada año (Campbell, 2025).

Usos y beneficios

El uso más significativo del cadmio ha sido históricamente en baterías recargables Ni-Cd, estas baterías se emplearon en herramientas eléctricas, equipos portátiles, sistemas de respaldo, trenes y aeronáutica por su gran durabilidad y resistencia a ciclos de carga/descarga.

Compuestos de cadmio como sulfuro de cadmio (CdS) y selenuro de cadmio (CdSe) han sido usados como pigmentos brillantes en plásticos, cerámica, vidrios y pinturas por su alta estabilidad de color y resistencia a la luz (Yang et al., 2025).

Las ventajas de estas baterías es que tienen una alta vida útil con muchos ciclos de carga, buen rendimiento en condiciones extremas de temperatura. Las desventajas es que tiende a ser altamente tóxico, lo que dificulta su manejo y reciclaje.

Aunque el cadmio (Cd) es un metal tóxico sin función biológica esencial, tiene beneficios técnicos importantes en ciertas aplicaciones industriales especializadas. Estos beneficios no son beneficios para la salud, sino propiedades físicas y químicas útiles que hacen que, en contextos muy concretos, se emplee a pesar de los riesgos y que, en algunos casos, todavía no exista un reemplazo perfecto (Cadmium, 2025)

Al formarse con otros metales, el cadmio puede aumentar la dureza y resistencia al desgaste, mejorar la resistencia a la fatiga de componentes mecánicos y permiten soldaduras con buena resistencia mecánica y eléctrica.

Impactos Ambientales

El cadmio es uno de los metales pesados más tóxicos y afecta negativamente los procesos biológicos esenciales de humanos, plantas y animales, las principales fuentes de contaminación por cadmio en el suelo incluyen la minería, el procesamiento y la fundición de zinc y el uso de fertilizantes fosfatados producidos a partir de mineral de fosfato de roca con niveles elevados de cadmio (NAP, 2024).

Las emisiones de fundiciones de zinc y cadmio contaminan las zonas ubicadas a sotavento, el uso de fertilizantes fosfatados puede incrementar el cadmio en el suelo y afectar la calidad de los cultivos.

Cuando se emplean fertilizantes con bajo contenido de cadmio a largo plazo, no se observa un aumento significativo de este metal en el suelo ni deterioro en la calidad del producto agrícola (Yang et al., 2025).

Impactos a la Salud

La exposición al cadmio (Cd) se asocia con un mayor riesgo de varios tipos de cáncer y con trastornos del sistema nervioso central, incluyendo enfermedades neurodegenerativas y deterioro cognitivo. También está relacionada con enfermedades óseas como osteoporosis y osteomalacia, daño renal, alteraciones cardiovasculares y pulmonares. Además, puede atravesar la barrera placentaria causando efectos teratogénicos y se vincula con la enfermedad itai-itai (Yang et al., 2025).

La enfermedad itai-itai fue causada por el consumo prolongado de arroz contaminado con cadmio en Japón y se caracteriza por fracturas óseas y osteoporosis, afectando principalmente a mujeres posmenopáusicas.

Presencia de Plomo (Pb) y Cadmio (Cd) en Suelos del Perú

En el ámbito antropogénico, una de las principales causas es la actividad minera y metalúrgica, especialmente en regiones con intensa explotación de minerales como La Oroya, Cerro de Pasco y Cajamarca.

La extracción, procesamiento y fundición de minerales liberan partículas y residuos con alto contenido de Pb y Cd que pueden depositarse en los suelos agrícolas y urbanos cercanos. Asimismo, los relaves mineros mal gestionados representan fuentes persistentes de contaminación, especialmente durante temporadas de lluvia, cuando ocurre lixiviación y dispersión de metales. (Castro B. et al., 2021)

Desde el punto de vista natural, el Perú posee una geología rica en yacimientos polimetálicos, lo que implica que ciertos suelos presentan concentraciones elevadas de metales debido al material parental.

Procesos como la meteorización de rocas mineralizadas y la actividad volcánica también pueden contribuir a la presencia natural de Pb y Cd en determinados ecosistemas andinos.

Tabla 2

Concentraciones reportadas de Pb y Cd en suelos de Perú (mg/kg).

Ubicación del estudio	Plomo (Pb)	Cadmio (Cd)	Análisis General
Lima – Carabaylo	66.97 mg/kg	0.86 mg/kg	Suelos periurbanos cerca del Parque Industrial Infantas presentan Pb y Cd, pero sus concentraciones se mantienen dentro de los estándares ambientales peruanos.
Cultivos de maca – Junín	0.20 mg/kg (Pb)	0.32 mg/kg (Cd)	La maca presentó acumulación de Cd y Pb por encima de límites recomendados, lo que podría generar riesgos crónicos para la salud mediante la cadena alimentaria.
San José de Yarinacocha – Ucayali	(valores comparados con ECA MINAM)	(Cd disponible)	Las muestras presentan variaciones mínimas respecto al promedio y no superan el ECA para suelo de 70 mg/kg, por lo que el área evaluada conserva condiciones adecuadas para uso agrícola.
Puno – Camacani	Concentraciones determinadas	Concentraciones determinadas	Las muestras analizadas presentan Cd y Pb, con mayores concentraciones posiblemente asociadas al uso de fertilizantes, lo que permite evaluar su influencia en la calidad agrícola del suelo.
Cajamarca – La Encañada	Pb y Cd en suelos y pasturas	Pb y Cd en suelos y pasturas	Estudios han analizado la presencia de Pb y Cd tanto en suelos como en cultivos alimenticios y pasturas a lo largo de tramos de carretera, estos valores no superan los ECA para suelos agrícolas.

Nota. Contaminación por metales pesados en los suelos agrícolas (C. o. J. Wilfredo, 2025)

La evidencia científica confirma que la presencia de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en suelos peruanos es real y varía según la región y el tipo de actividad humana. En zonas urbanas e industriales, las concentraciones de Pb suelen ser más elevadas debido al tráfico y actividades industriales. En áreas agrícolas, aunque algunos valores no superan los estándares ambientales, la acumulación progresiva de metales pesados representa un riesgo para la salud y la seguridad alimentaria, especialmente en el sistema suelo-planta. En conjunto, la distribución heterogénea de Pb y Cd en el país evidencia la necesidad de fortalecer y sistematizar el monitoreo ambiental (Mendoza et al., 2021)

Movilidad y disponibilidad de metales en el suelo

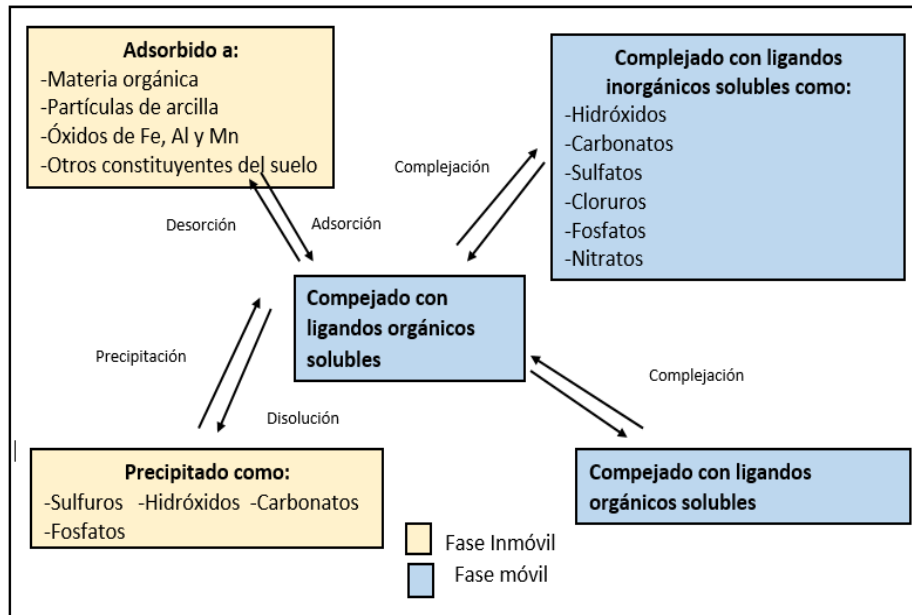
El autor resalta que en la movilidad de un metal en los suelos son descritas en la rapidez con las que estas se transfieren de un medio a otro; en lo contrario la bio-disponibilidad donde a la fracción del metal es donde pueden ser absorbidas e incorporadas en los receptores (Pérez, 2005).

Según nos indica sobre los procesos y los mecanismos en la determinación de la movilidad y las disponibilidades en los metales pesados (Rieuwrts et al. 1998) donde en los siguientes nos menciona:

Precipitación es típicamente asociado con ácido suelos, donde eso depende principalmente en pH y tiene potencial redox propiedades, como bien como metales donde eso puede ocurrir con hidroxilos, azufre, carbonatos, y fosfato.

Figura 4

Fases de movilidad de metales.



Nota. Influencia en la fase de móvil e inmóvil en la disolución del suelo.

Parámetros del suelo y movilidad de metales

Algunos suelo físico y químico características, tal como su potencial para hidrógeno iones (pH), textura, eléctrica conductividad, potenciales redox (Eh), contenidos orgánicos importa la materia orgánica y la presencia de Hierro, Magnesio, y Aluminio óxidos, son de cerca relacionado a los efectos de metales. la flexibilidad y biodisponibilidad (Komarék et al., 2009).

Por lo tanto, con la excepción de Arsénico, molibdeno, selenio, cromo, que son más móviles a pH alcalino, la mayoría de los metales no se adsorben fuertemente y están fácilmente disponibles a pH ácido. (Segovia, 2014).

Similar a esta, orgánicos reaccionar con metálico elementos a generar solubles complejos y con Cu, Pb, y Zn a formar organometálicos complejos, cual facilita sus movilidades. Sin embargo, porque de sus cristalinidades, alto Fe y Mn concentraciones en rocas tener la habilidad a arreglar metales, particular As, Cu, and Pb (Segovia, 2014).

Composición y estructura del Biochar

El biocarbón es uno de los productos rico en carbono obtenido a través de un proceso de pirólisis con bajo contenido de oxígeno llamado pirólisis. (Lehmann et al., 2011).

Los principales polímeros presentes en la biomasa residual, tales como la lignina, la celulosa y la hemicelulosa, se pirolisan en biocarbón (sólidos), bioaceites (volátiles) y los gases no condensables (O, CO₂, CH₄, H₂). Se obtienen dos productos principales. (Suliman et al. 2016 & Oliveira et al., 2017).

Influencia de la temperatura y materia prima

La sinterización es un proceso cuyas condiciones, como el material inicial, la temperatura, el tamaño de las partículas y el pretratamiento de la biomasa, entre otros factores, determinan las propiedades químicas del biocarbón. Sin embargo, las propiedades finales del biocarbón están más influenciadas por las características iniciales del material. (Tang et al. 2013).

De esta forma, se obtiene biocarbón con bajas temperaturas de pirólisis (<500 °C) y propiedad ideal para las remediaciones de las superficies afectados con los hidrocarburos. Esto se debe a que los suelos contaminados con metales dan como resultado una superior acidez y una alta polaridades superficiales. Abundantes grupos funcionales que contienen oxígeno (carboxilo, hidroxilo, fenol). y el contenido alto del carbono (Oliveira et al., 2017).

En la fabricación de la enmienda orgánica al utilizar temperaturas altas (>500 °C), la especie de carbono alifático se convierte en anillo aromáticos para formar estructuras similares al grafeno, lo que mejoran las distribuciones de los poros, el volumen del poro y el área superficial que es ideal para las adsorciones de los compuestos orgánicos (Sun et al, 2018).

A temperaturas más altas, los materiales pueden cambiar de sólido a líquido o de líquido a gas. A medida que baja la temperatura, los materiales gaseosos pueden cambiar a un estado líquido y un estado líquido a un estado sólido. La materia puede cambiar de un estado agregado a otro; estos cambios reciben un nombre (Pandey et al., 2020).

Efectos del Biochar

A través de un meta análisis se comprende que los efectos que genera el Carbón Vegetal en los procesos de la remediación sobre los elementos pesados, nos resulta que el uso de la textura del Carbón Vegetal nos genera un papel visible e importante en los rendimientos que detalla en los cultivos, llegando a ser muy beneficioso en los suelos con unas texturas pesadas que en los lugares para obtener los de una ligera textura y media donde los mecanismos de la bio acumulación de los elementos pesados llega a implicar la absorción electrostática, interacciones indirectas, los intercambios iónicos y las precipitaciones, aun sin embargo se encuentra las macropartículas del Carbón Vegetal con lo cual pueden llegar a salir al nivel más profundo, donde se transporta aquellos metales en aguas subterránea He et al. (2019).

La producción presenta alto porcentaje de carbono, porosidad, áreas superficiales y el alta específica en las cuales nos posibilitan la efectividad para que intercambien cationes, la conductividad eléctrica, la estabilidad, las inercias e inmovilizaciones de los contaminantes y mejorando las disponibilidades del carbono, del N y el fósforo (Capela et al 2020).

En respecto, existen los estudios los que demuestran que en las inserciones del Carbón Vegetal, donde en el suelo se modifica su capacidad en las retenciones del agua, en lo cual se dividió una superior porosidad , como también una superficies específicas y los dominios hidrofóbicos, pero sin embargo donde existen varios con los que muestran lo contrario y lo siguiente de las aplicaciones al suelo, en

lo que se tienden a suponer en lo que se cuenta con las demostración son diferidas debido a las existentes propiedades que son propias donde cada tipo de Carbón Vegetal y el suelo (Razzaghi et al, 2020).

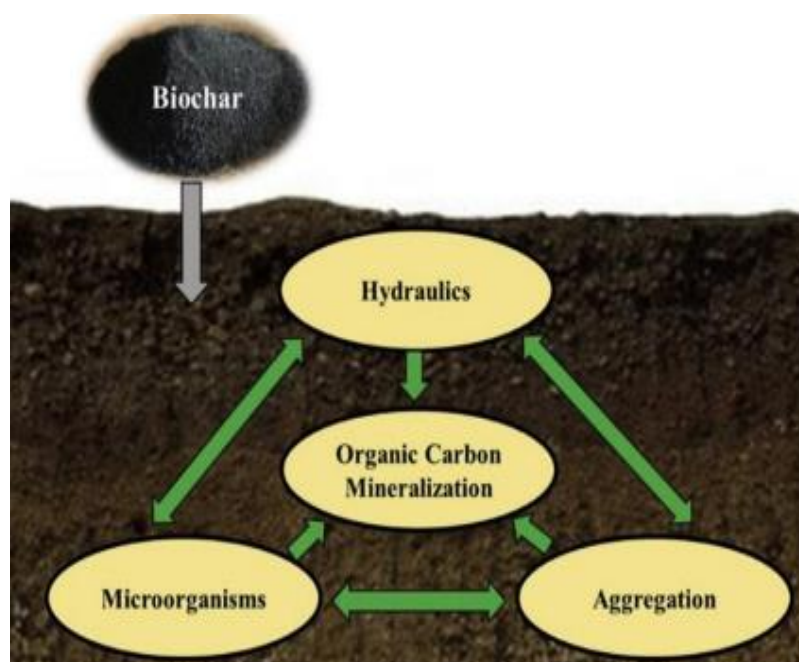
Se utilizan tecnologías de remediación muy limitadas para su remediación, una de las cuales es la tecnología de aplicación de biocarbón, que se considera como un suplemento orgánico, un sólido barato obtenido por hidrogenación de las biomásas residuales por medio de tratamiento físicos. Un proceso químico para propiedades que ayudan a limpiar los suelos contaminados. Por teniendo un favorable impacto en la físico y químico propiedades del suelo (p. Ej., creciente agua retención, aglomeración, permeabilidad, y ion adsorción), biochar puede mejorar suelo fertilidad y impulsar planta producción (Pandey et al., 2020).

La mineralización de carbón en las dosis que son altas para poder aumentar la fijación de los carbonos orgánicos de las superficies, para poder mejorar las estabildades de los que se agregan y los organismos que se encuentran en los suelos (Meza-Pérez 2006).

El bio-carbón puede mejorar la fertilidad del suelo a través de sus efectos positivos sobre las propiedades fisicoquímicas, como una mayor retención de agua, agregación, permeabilidad y adsorción de iones, lo que aumenta el rendimiento de las plantas. Se ha comprobado que el uso de biocarbón impacta la actividad biológica del suelo, ya sea porque su estructura altamente porosa crea un hábitat favorable para los microorganismos o porque modifica la disponibilidad de sustratos y las actividades enzimáticas asociadas a su superficie o a su entorno inmediato (Zhang et al., 2013).

Figura 5

Remediación de las superficies afectadas por minería



Nota. Aplicaciones de carbón vegetal y aumento de las fijaciones de carbono-orgánico de los suelos, Zhang et al. (2013).

Las características del Carbón Activo ayudan a que se capte los contaminantes en los suelos con elementos metálicos que son considerados potencialmente tóxicos, el suelo tratado o con una aplicación de Biochar recibe intereses debido a las capacidades que tiene para minimizar la asimilación de los metales pesados (Albert et al., 2021).

El carbón vegetal o también conocido como biocarbon se utiliza para estabilizar los hidrocarburos en las superficies que están contaminadas por estas, lo que hace es atrapar el CO₂ para poder mejorar el rendimiento de las producciones, absorbiendo todos los metales para aumentar la producción del suelo para poder generar reducir las superficies afectados, se puede concluir que el biocarbón es una solución para enmendar los suelos que están afectados por metales pesados (Zhang et al., 2013).

Calidad de Suelo

El autor destaca cual es la importancia de estudiar estos recursos de áreas forestales que se extienden. Los estudios que se encontraron relacionados con este ecosistema están relacionados con algunos de los procesos de manera natural o antrópicos que degradación de las cualidades de los suelos, uno de los cuales es el cambio de uso y en él relacionados con acciones de reforestaciones y conservación del ambiente. La calidad debe entenderse como el uso permanente de la tierra para un fin específico. La calidad de los suelos se considera una verdadera función y mala o incluso peor que otras funciones. Además, se ofrecen muchas propiedades indicadoras de calidad. La evaluación de la calidad se considera un instrumento que es ideal determinando qué tan bien está funcionando un suelo en un momento dado y qué se necesita para funcionar mejor, ya que nos proporcionan informaciones sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas (Meza-Pérez 2006).

Tabla 3

Estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo

Usos de Suelo					
N°	Parámetros	Suelo Agrícola	Suelo Residencial Parques	Suelo Comercial/ Industrial/Extractivos	Método de ensayo
			Orgánicos		
1	Benceno (mg/kg MS)	0.03	0.03	0.03	EPA 5260-B EPA 5021-B
2	Tolueno (mg/kg MS)	0.37	0.37	0.37	EPA 82660-B EPA 8021
3	Elibenceno (mg/kg MS)	0.082	0.082	0.082	EPA 8260-B EPA 8021-B

Nota. Valores máximos establecidos por el ministerio del ambiente.

Lo que se debe de considerar en las evaluaciones de las calidades de los suelos son las propiedades y sus procesos biológico, fisicoquímicos, por lo que las interpretaciones y la medición se evalúa frente a las propensiones a un tiempo largo o los signos de la viabilidad que darán como resultado el deterioro, los mantenimientos o las mejoras de la calidad del suelo. La evaluación proporcionará resultados sobre cómo se encuentra el estado funcional del suelo en el momento concreto y permitirá la identificación de las zonas que son de interés, como también las zonas problemáticas o la comparación de diferentes suelos bajo gestión (Jiménez & González, 2006).

Las cualidades de las superficies tienen un indicador (I. C. S.) este es utilizado para medir cual es las cualidades de los suelos, que utiliza una técnica de análisis multivariante para combinar cosas. Considere un índice que apunta a algo; ya sea que el suelo sea bueno, malo o normal, no se puede trabajar. Además, ICS puede aprender acerca de las debilidades o fortalezas para que las prácticas de manejo recomendadas puedan aplicarse a esas tierras más adelante (Jiménez & González, 2006).

Una métrica es un conjunto de medidas u observaciones definidas por un investigador que empíricamente considera que estos datos son importantes que sirven como referencias para poder evaluar los sistemas o recursos en particular. Las métricas a menudo no solo pueden describir, sino también monitorear el mismo tema de investigación a lo largo del tiempo. Estos indicadores son herramientas muy adecuadas para evaluar y monitorear agroecosistemas, pero tienen que ser apropiados en tiempo, espacios y condiciones específicas de investigación para demostrar la viabilidad del sistema (SQI. 1996, Parr, J et al. 1992). La calidad del suelo será evaluada por medios de estos indicadores.

Indicador de calidad de los suelos

Los indicadores del suelo se basan en las propiedades medibles que influyen directamente en la capacidad para que se cumplan las funciones ambientales y sostener la producción de los cultivos, las prácticas de uso y manejo del suelo permiten la evaluación del grado y la dirección de los cambios que se dan en las características del suelo a lo largo del tiempo. Las características del suelo que tienden a ser más sensibles a las prácticas de manejo suelen considerarse los indicadores más adecuados, por que permiten detectar mejor las modificaciones que son generadas por las actividades humanas, muchas de estas características están relacionadas entre sí, por lo que la variación de uno puede influir cambios en otros. (Pulido, 2014).

Los indicadores son variables utilizadas para resumir y representar información relevante sobre determinadas condiciones o fenómenos de interés, permitiendo describirlos, medirlos y comunicar sus características de manera comprensible. Generalmente se emplean variables cuantitativas porque facilitan la medición y comparación de los datos; sin embargo, también pueden utilizarse variables cualitativas, nominales u ordinales cuando la información no puede cuantificarse directamente o cuando su medición resulta demasiado compleja o costosa. Entre las principales funciones de los indicadores se encuentran la evaluación de condiciones actuales o tendencias, la comparación entre diferentes lugares o situaciones, la verificación del cumplimiento de metas u objetivos, así como la generación de información que permita anticipar posibles cambios o prever condiciones futuras (Vallejo, 2013).

Tabla 4*Evaluación del suelo mediante los indicadores e índices.*

Índice de calidad de suelos	Escala	Clase	
Muy alta calidad	0.80-1.00	1	
Alta calidad	0.60-0.79	2	
Moderada calidad	0.40-0.59	3	
Baja calidad	0.20-0.39	4	
Muy baja calidad	0.00-0.19	5	—

Nota. Indicador e índice de calidad para el suelo (ICS).

Es importante poder decretar líneas de base o líneas de base para actividades que puedan tener resultados de manera positivos tanto como negativo en el ambiente, umbrales para controlar o monitorear efectos negativos que no deben exceder umbrales predeterminados, y la idoneidad de un objetivo o respuesta objetivo para poder evaluar efectos positivos o efectos negativos durante mucho tiempo (Cabrera, 2014).

Los indicadores utilizados deben de tener pocos en lo que respecta a numeración de modo que así será manejado con mayor facilidad, deben de ser simples, claros y fáciles de medir, para que se pueda sintetizar o resumir distintas cualidades y características del suelo. Los indicadores deben de integrar distintas características del suelo, teniendo en cuenta propiedades fisicoquímicas y biológicas donde se pueda visualizar las variaciones temporales, así facilita el monitoreo del suelo a largo tiempo (Prieto, 2013).

Según el autor las características fisicoquímicas y biológicas de los suelos que son considerados que indican cual es la calidad que se

debe de cumplir en tanto a unas condiciones (Bautista et al., 2004) donde se detalla en la siguiente:

Se realiza la descripción de los procesos ecosistémicos donde se integran las características físicas, químicas y biológicas del suelo, nos ayuda a reflejar cuales son los atributos de sostenibilidad que se requiere medir, la variación del manejo del suelo debe de ser o no sensitivos, tiene que tener la característica de ser reproducible, los resultados de la degradación antropogenética deben de ser sensibles a los que respecta el cambio del suelo.

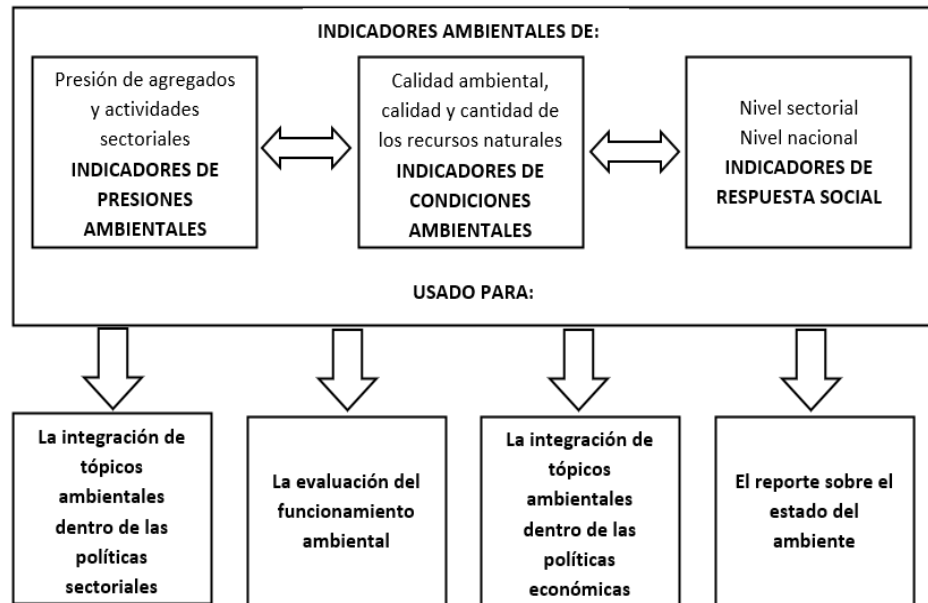
Propiedades Físicos

El autor nos dice que la característica física que se pueden utilizar como un indicador de las cualidades del suelo estas son las que reflejan la forma en que el que estos recursos aceptan, almacenan y transportan el recurso hídrico en las producciones, del mismo modo lo que limitaba al crecimiento de la raíz, los contratiempos, las infiltraciones o las filtraciones. Los movimientos del agua en el perfil también están relacionados con la distribución de la partícula y los poros (Gustin et al. 2014)

La textura, las densidades aparentes, las estabilidades del agregado, las infiltraciones, las profundidades de las superficies de los suelos, las capacidades de los almacenamientos hídricos y la conductividad hidráulica cargado son características físicas de la superficie propuestas como indicadores en la propiedad de los suelos (Gustin et al., 2014).

Figura 6

La naturaleza y los usos de los indicadores ambientales



Nota. El gráfico muestra los diferentes indicadores ambientales usados para la integración y evaluación del funcionamiento ambiental, tomado de Ortega (1995).

Indicadores Químicos

Se hace referencias a la condición y al aspecto que pueden afectar la relación de los suelos con las plantas, como también puede afectar a las cualidades hidricas en el suelo, las capacidades amortiguadoras del suelo, la disponibilidades o retención del agua, las presencias de los nutrientes en las plantas y en los microorganismos son algunos de los indicadores que nos muestran la presencia de materia orgánica, como el Ph entre otros.

Una de las cualidades que tiene el suelo para saber su calidad es la fertilidad, que puede evaluarse mediante parámetros químicos como el pH, la capacidad de intercambio de cationes, los carbonos orgánicos totales y las saturaciones de álcali.

Las producciones de los cultivos en los agroecosistemas dependen de la interacción de todos estos rasgos determinantes de la fertilidad. Uno del componente químico destacado es el carbono-orgánico de los cuales dependen de manera directa la diversidad y

actividad de fauna y poblaciones de microbios en el suelo, así como muchas otras características de las superficies. (Parr, J et al. 1992).

La naturaleza química tiene un proceso esencial para las fertilidades del suelo, a saber, los intercambios de iones entre los complejos de los intercambios (fase sólidas o coloidales) y las soluciones de los suelos en el que el nutriente absorben por las raíces de las plantas. Los complejos de intercambio contienen cationes como Ca, Mg, K y Na. se adsorbe. Estos iones son cargados positivamente pueden intercambiarse por ion que sean del mismo peso en la solución del suelo, que a su vez proporcionan los nutrientes resultantes al suelo (Ortega, D. 1995).

Indicadores Biológicos

Los suelos son considerados uno de los recursos vivos que contienen una variedad de especies, microorganismos y macroorganismos, incluyendo a la lombriz, bacteria, hongo y artrópodos, estas especies son considerados bioindicadores (Montalvo, 2013).

Están estrechamente relacionados con MOS y COS, que determinan la biomasa calculando la diversidad y cantidad del organismo que existen en el área de estudio (Arcos, 2019). El autor indica que los suelos viven distintos seres vivos; la fauna edáfica y los animales ejercen una de las funciones más importantes en relación al ciclo de los nutrientes. Los organismos afectan las evoluciones que se dan en el suelo donde se participa de las mezclas de partículas orgánicas y los minerales, para la formación del poro y el agregado de materia fecal, por estas razones del organismo es considerado uno de los factores formadores de los suelos (López, 2015).

Tabla 5*Técnicas e equipos de recolección de datos para parámetros biológicos.*

VARIABLE	INDICADOR	TÉCNICA	EQUIPO
Recuperación de suelos Contaminados	Parámetro biológico Materia Orgánica	Observación	PCE-PH 30

Nota. La tabla muestra equipos para la recolección de datos, para el indicador del parámetro biológico.

Define el microbiota de la superficie ya que juega un papel clave en las mineralizaciones de las materias orgánicas, ya que las plantas dependen de ella para obtener parte del suministro de sales minerales y nutrientes que las plantas pueden absorber. También afectan la hidratación de MO y las fijaciones de nitrógeno por bacterias fijadoras de N, Clostridia y la simbiosis entre leguminosas y rizobios. Esto es muy importante porque el nitrógeno puede ser un factor limitante en la evolución de las plantas. La micro biota participa en el ciclo trófico de varios componentes, por ejemplo; carbono, Nitrógeno, Azufre, Fosforo, Calcio, Hierro, Magnecio, etc (Pérez, 2010).

Aporta que en los suelos viven distintos organismos; los animales y las faunas ejercen unas funciones importantes con respecto al ciclo del nutriente. Algunos organismos pueden dañar las evoluciones de los suelos que participaron de las mezclas de partículas orgánicas y mineral, en las formaciones de los poros y agregados por materia fecal, por estas razones estos organismos son considerados como factores formadores del suelo (López, 2015).

Se define ciclo de nutrientes explicado como la meso fauna y la macro fauna del suelo absorben materias orgánicas y la reducen o degradan. Hacen una unión entre el suelo para así poder potenciar la porosidad, lo que mejora la condición en la que se da la mineralización de esta M. O. Incrementan también su disponibilidad del nutriente en

los estiércoles para controlar las poblaciones de microbios (Pérez, 2010).

Funciones ecológicas del suelo

En la agricultura orgánica se dan distintas prácticas, como la utilidad de los fertilizantes que ayudan a mejorar las características ya sea química, física o biológica de los suelos que aumentan la diversidad de los organismos del suelo, se utilizan como una alternativa de manejo para el crecimiento para que el suelo será fértil al momento de cultivarlo de tierras bajas. agricultores de ingresos (Labrador, 2001).

Diferentes especies de invertebrados realizan las diferentes funciones en estos procesos. Como medio para el ciclo de nutrientes, regula la dinámica de la materia orgánica del suelo, la retención de carbono y los cambios en la estructuras de los materiales del suelo. (Abi-Saab, 2012).

Algunos servicios no son esenciales para la funcionalidad de los ecosistemas de forma natural, por tanto, también son los recursos más importantes para la gestión sostenibles del sistema agrícola (Cabrera y Crespo, 2001).

Características de la calidad del suelo

La textura del suelo se puede medir en términos de porcentaje de arena, limo y arcilla. El pH del suelo se puede medir en una escala de 0 a 14. El contenido de nutrientes del suelo se puede medir en términos de concentración de nutrientes, como el nitrógeno, el fósforo y el potasio. La actividad microbiana del suelo se puede medir en términos de la cantidad de microorganismos presentes. Un índice de calidad del suelo es una combinación de diferentes mediciones que se utilizan para proporcionar una visión general de la calidad del suelo. Hay muchos índices de calidad del suelo diferentes y cada uno tiene sus propias ventajas y desventajas.

Debe enfatizarse que muchas curvas de clasificación dependen del tipo de suelo, el tipo de planta o las condiciones involucradas. Por ejemplo, la curva de calificación del pH del suelo indica un nivel óptimo de 6 a 6. Aunque esto se aplica a la mayoría de los 27 cultivos, el valor óptimo debería estar cerca de los cultivos en suelos de tejido o algunas plantas forestales en suelos minerales. al pH. 5 1.

Las características de la tierra incluyen (Galán, 2008):

- pH. Los recursos de los metales en mayor parte se encuentran en los ambientes con el Ph ácidos, sin embargo, existen algunos metales que se pueden incluir como unas excepciones.
- Textura. El suelo arcilloso es el que retiene mayor cantidad de metales conocidos también como hidrocarburos, esto sucede porque los suelos arenosos disponen de una mínima o cero capacidades de retención, este es el motivo por el cual se da la afectación de las aguas que son subterráneas.
- Materia orgánica. Esta es una característica importante para las formaciones de los quelatos, lo que ayuda esta materia es a que queden inmovilizadas algunos metales. Por lo contrario, también pueden formar complejo de orgao-metalicos ose significa que la movilidad se multiplicaría.
- Capacidad de cambio. El intercambio de cationes es un poder necesario, entre otros factores, de los tipos de mineral de la arcilla. Según los distintos tipos de arcilla, todos varían sus características, en algunos la retención, donde queda la mínima para la caolinita, baja para las illitas, alta para las esmectitas y máxima para las vermiculitas.
- Condiciones redox. Si contamos con una condición potencial de oxidación o reducción este suelo puede alcanzar una estabilidad con los hidrocarburos.
- Salinidad. La salinidad puede aumentar la movilización en el caso de aquellos metales, y en otros aumentar su retención.

Frecuentemente los elementos metales tienen una movilidad relativamente baja, se acumulan en el primer centímetro del suelo y se lixivian en cantidades muy pequeñas en las capas inferiores. Por lo tanto, si la afectación fue provocada por el ser humano, la profundidad de la existencia de altas concentraciones en las capas superiores se reducirá drásticamente (Galán, 2008).

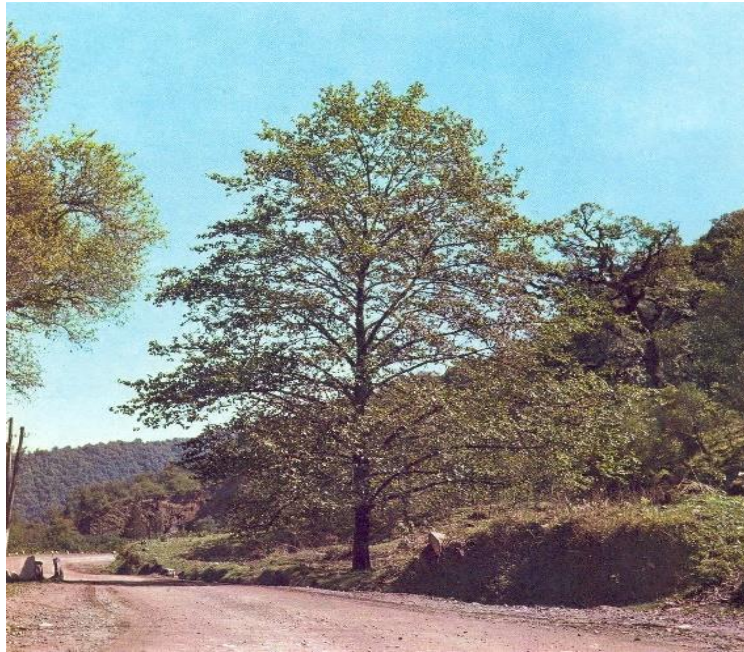
Alnus acuminata

En el Perú, el aliso (*Alnus acuminata*), de la familia Betulaceae, es uno de los pocos árboles capaces de fijar nitrógeno. Su distribución en el es limitada en algunos departamentos, pero es altamente valorado por las comunidades andinas debido a sus propiedades fisicoquímicas y su adaptabilidad. El nombre de la especie, *acuminata*, deriva del latín *acuminatus*, que significa agudo o esbelto, en referencia a las hojas puntiagudas en su base. El proceso de fijación de nitrógeno no es exclusivo de las plantas leguminosas; el aliso tiene la capacidad de establecer asociaciones simbióticas con bacterias actinomicetos del género *Frankia* y hongos micorrizógenos que generan esta actividad biológica.

El jaúl (*Alnus acuminata*) es una especie capaz de fijar N atmosférico, lo que la hace de utilidad para mejorar suelos degradados (Artunduaga, 2018).

Figura 7

Árbol Alnus acuminata



Nota. Se muestra una especie de la Familia Betuláceas (Wikipedia contributors, 2026)

Origen

El aliso es una especie nativa de Centroamérica y América del Sur, que habita en áreas de montaña media y alta, comúnmente en laderas empinadas con condiciones secas.

Su distribución se extiende desde el noroeste de México hasta el norte de Argentina, incluyendo los Andes de Perú y Bolivia. Además, ha sido exitosamente introducida en el sur de Chile y en Nueva Zelanda. En Colombia, se encuentra principalmente en las cordilleras Central y Oriental (CORPOICA, 2010).

Tabla 6*Clasificación taxonómica*

Reino	Vegetal Planta
Subreino	Tracheabionta
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Hamamelididae
Orden	Fagales
Familia	Betulácea
Género	Alnus
Especie	Acuminata
Nombre Científico	<i>Alnus acuminata</i>

Nota. Clasificación taxonómica citada por CORPOICA (2010).

Anatomía del árbol de aliso (*Alnus acuminata*)

El aliso es un árbol de hojas que caen en invierno, crece de manera recta y puede llegar a medir hasta 30 metros de altura. Tiene una copa estrecha, con hojas en forma de óvalo que miden entre 6 y 15 cm de largo y entre 3 y 8 cm de ancho. Los bordes de las hojas son finamente serrados, y tanto el anverso como el reverso de las hojas son lisos y sin vello cuando el árbol madura (CORPOICA, 2010).

En términos generales, la copa del aliso es angosta, irregular y abierta. En el Perú, esto también varía según la altitud. Por ejemplo, los alisos de la región de Cusco, a 2800 m.s.n.m., tienen una copa más densa y con mayor follaje, mientras que los de la región de Puno, a 3500 m.s.n.m., presentan una copa más abierta (Añazco, 1996).

Figura 8

Árbol *Alnus acuminata*



Nota. La figura muestra la copa del árbol de la familia Betuláceas (CORPOICA 2010).

El tronco del aliso es recto, con ramas laterales poco desarrolladas, su corteza es de color gris claro, casi blanca, y es lisa o ligeramente rugosa. En los árboles más viejos, la corteza se vuelve escamosa. Además, tiene pequeñas manchas ovaladas de color amarillento, llamadas lenticelas, que están dispuestas horizontalmente a lo largo del tronco.

Figura 9

Corteza del árbol *Alnus Acuminata*



Nota. La figura muestra el tronco del árbol de la familia Betuláceas (UEIA 2014).

Las raíces del aliso son muy anchas y se extienden cerca de la superficie del suelo. A unos 5 cm de profundidad, se forman estructuras similares a los nódulos de las legumbres, necesarias para el intercambio de oxígeno. Estos nódulos son producto de la interacción con actinomicetos del género *Frankia*, microorganismos que fijan nitrógeno del aire y establecen una relación simbiótica con la planta. Esta simbiosis mejora las condiciones del suelo, facilitando el crecimiento de algas en áreas como suelos minerales, zonas de deslizamientos, terraplenes de carreteras o terrenos pobres en nutrientes (Loján, 1992).

Las hojas del aliso tienen un color verde intenso en la parte superior y un tono más claro en la inferior. Son aovadas, con un limbo peciolado de hasta 20 cm de largo y pecíolos de al menos 2 cm. Los bordes son ligeramente dentados, con una nervadura áspera y bien definida. Están dispuestas de forma alterna en las ramas. (Carrillo, 1998).

Figura 10

Composición de hojas



Nota. La figura muestra las hojas del árbol de la familia Betulaceae.

Las inflorescencias femeninas del aliso aparecen en forma de pequeños racimos, en los cuales se agrupan de 3 a 4 flores. Cada una de estas flores tiene una forma similar a un cono, con un tamaño que varía entre 0.1 y 0.3 centímetros de largo y un diámetro de 0.8 a 1.2 centímetros.

Su color cambia a medida que maduran: cuando están en etapas tempranas, son de un tono verde, pero a medida que avanzan en su desarrollo, adquieren un color marrón o café. Este proceso de cambio de color refleja el estado de maduración de las flores (CORPOICA, 2010).

Figura 11

Las flores masculinas miden 7 cm de largo, son alargadas y pendulares.



Nota. La figura muestra las flores del árbol de la familia Betulaceae (UEIA 2014)

Los frutos del aliso tienen una forma que recuerda a pequeñas piñas o conos, lo que los hace fácilmente identificables. Aunque la producción de estos frutos puede ocurrir a lo largo de todo el año, su aparición es más frecuente entre los meses de enero y junio en ciertas regiones.

Es importante recolectarlos en el momento adecuado, preferiblemente cuando su color ha cambiado a amarillo o rojo oscuro, lo que indica que están maduros y listos para ser cosechados (Loján, 1992).

Figura 12

*Los frutos de la especie *Alnus acuminata* es estacional.*



Nota. La figura muestra los frutos del árbol de la familia Betulaceae (Loján, 1992).

Zonas de vida

El aliso se desarrolla adecuadamente en bosques húmedos de montaña baja, como el bosque húmedo montano bajo (bh-MB) y el bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB), áreas que se ven influenciadas por la condensación de la neblina periódica. Incluso puede encontrarse a altitudes más bajas, en zonas pre-montañas (INEFAN, 1992).

Según el Sistema Holdridge, las formaciones ecológicas que ocupa esta especie incluyen áreas cerca de cursos de agua en estepa montano (e-M), bosques muy húmedos en montaña baja (bmh-MB), bosques secos en montaña baja (bs-MB) y bosques húmedos en montaña (bh-M). La altitud más baja de estas formaciones se encuentra en el bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB), que va desde los 2.600 hasta los 3.200 metros sobre el nivel del mar, y la más alta se alcanza en el bosque húmedo montano (bh-M), con altitudes de hasta 3.800 metros (Carrillo, F., 1998).

Exigencias del Suelo

El aliso no es exigente en cuanto al suelo, crece en suelos muy pobres, que los mejora puesto que fija nitrógeno al suelo. Es planta pionera en zonas devastadas por quemas y erosión, por su capacidad de producir bastante material orgánico rico en nitrógeno, se puede considerar el aliso, como una de las especies más importantes para la recuperación de los suelos. (Carrillo, 1998).

Temperatura

El aliso es una especie que generalmente se encuentra en climas templados, con un rango de temperatura media entre 4 y 27 grados Celsius. Aunque puede tolerar temperaturas que temporalmente bajen hasta 0 grados Celsius, después de sufrir heladas breves y daños en su follaje, la especie se recupera rápidamente. En las zonas más altas, crece bien en quebradas protegidas, ya que los vientos secos y fríos pueden afectar negativamente su desarrollo (Carrillo, 1998).

Precipitaciones

El aliso crece bien en áreas con precipitaciones anuales de alrededor de 500 mm, aunque prefiere climas más húmedos. Es una especie que requiere alta humedad, especialmente durante la germinación y el desarrollo inicial, ya que las plántulas, que alcanzan entre 0.05 y 0.07 m de altura, son muy sensibles a la sequía. Por lo general, la regeneración natural del aliso solo ocurre en lugares húmedos, como cerca de quebradas y riachuelos (INEFAN, 1992).

Una vez establecido, el aliso puede tolerar cierta cantidad de sequía. En áreas secas, sus troncos múltiples le permiten producir una gran cantidad de biomasa y contribuir a la recuperación de suelos erosionados. En estos lugares, es sorprendente la rapidez con que se forma una capa de humus en las zonas cercanas al aliso (Carrillo, 1998).

2.3 DEFINICIONES CONCEPTUALES

A) Remediación

Son conjuntos de actividades realizadas en un área contaminada para que se elimine o pueda disminuir los contaminantes con la finalidad de consolidar la preservación de la vitalidad de las personas y las integridades del ecosistema, con el objetivo adicional de evitar los efectos ambientales de una o más actividades ya sea pasada o del presente sobre el suelo (MINAM, 2016).

B) Calidad de suelos

El estado del suelo está determinado por sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Entre las físicas se incluyen la textura, estructura, densidad y permeabilidad; las químicas comprenden el pH y el contenido de nutrientes; y las biológicas están relacionadas con la materia orgánica y la actividad microbiana. El equilibrio de estas características permite que el suelo cumpla funciones importantes, como sustentar la vida, favorecer la producción agrícola y pecuaria, y proveer diversos recursos naturales. (MINAM, 2016).

C) Metales pesados

La contaminación tiene una naturaleza, como los metales tienen su forma de deposición, las condiciones del medioambiente producen acidificaciones, como también los cambios en las condiciones redox, variaciones de la temperatura y la humedad en el suelo, su toxicidad de estos metales es dependiente únicamente para la acumulación de estos sino también de la movilidad y sus reactividades (Sauquillo et al., 2003).

D) Degradación

Son los procesos de descomposición de sustancias por medios fisicoquímicos y biológicos, así como la pérdida de propiedades originales o debilitamiento de elementos como consecuencia de la erosión; la pintura se deteriora debido al calor, la humedad, la luz solar o el desgaste natural (Companies, 2019).

E) Biochar

Son los derivados del carbono estable hecho de biomasa de plantas y/o animales. Para su uso en la agricultura sostenible, se produce en condiciones de baja temperatura. El biochar debe ser de calidad definida y controlada y estar disponible para que las propiedades físicas puedan mejorar las propiedades físicas, propiedades químicas de la superficie y/o eficacia biológica (Refértil, 2020)

F) *Alnus acuminata*

La corteza del aliso de los Andes no es impermeable y se pudre en contacto con el suelo, sin embargo, el aspecto más importante del Aliso es sus capacidades que tiene el Nitrógeno para fijarse en la superficie, fertilizando el suelo de modo natural. Se considera una especie importante para la restauración de suelos degradados. (Blogspot, 2012)

G) Nivel de Remediación

Las concentraciones específicas del sitio de sustancias químicas de interés determinadas en los suelos de ECA durante las investigaciones de las evaluaciones de cuáles serían los riesgos para las personas y el ambiente se pueden indicar cuales son los niveles de enmienda que son específicos para los sitios (MINAM 2014).

H) Sitio contaminado

Las propiedades químicas del suelo se ven perturbadas de manera negativa esto se debe a la aparición de las sustancias que son químicas considerados contaminantes depositados como consecuencia de la actividad humanas realizada en la concentración que, dependiendo de los usos existente o previsto del lugar y su entorno, donde se supone un peligro para la calidad de vida o el ambiente.

2.4 HIPÓTESIS

2.4.1 HIPOTESIS GENERAL

Hi: Existe diferencia en el efecto remediador de diferentes dosis de biochar de aliso en la calidad del suelo contaminado por metales pesados.

H0: No existe diferencia en el efecto remediador de diferentes dosis de biochar de aliso en la calidad del suelo contaminado por metales pesados.

2.4.2 HIPOTESIS ESPECIFICAS

Hi1: Existe diferencia significativa en los parámetros físicos del suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.

H01: No existe diferencia significativa en los parámetros físicos del suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.

Hi2: Existe diferencia significativa en los indicadores químicos de fertilidad y nutrición del suelo antes y después de la aplicación de las diferentes dosis de biochar.

H02: No existe diferencia significativa en los indicadores químicos de fertilidad y nutrición del suelo antes y después de la aplicación de las diferentes dosis de biochar.

Hi3: Existe diferencia significativa en los indicadores químicos de degradación en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.

H03: No existe diferencia significativa en los indicadores químicos de degradación en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.

Hi4: Existe diferencia entre la concentración de metales pesados (cadmio y plomo) en el suelo antes y después de la aplicación de las diferentes dosis de biochar.

H04: No existe diferencia entre la concentración final de metales pesados (cadmio y plomo) en el suelo antes y después de la aplicación de las diferentes dosis de biochar.

2.5 VARIABLES

2.5.1 VARIABLE INDEPENDIENTE

Remediación

2.5.2 VARIABLE DEPENDIENTE

Calidad de Suelo

2.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLE

Tabla 7

Operacionalización de variable

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicadores	Unidad de Medida	Tipo de Variable
Variable Independiente Remediación	Proceso de recuperación de suelos contaminados mediante la aplicación de biochar, obtenido por pirólisis de su biomasa, presenta alta porosidad, estabilidad estructural lo que mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, además de inmovilizar metales pesados y reducir su biodisponibilidad (Refértil, 2020)	Aplicación de biochar de aliso incorporado al suelo contaminado en dos proporciones experimentales establecidas en el diseño del estudio.	Dosis remediadora	Dosis de tratamiento al 15% Dosis de tratamiento al 30%	Categórica Nominal
Variable Dependiente Calidad del suelo	Conjunto de propiedades físicas y químicas que determinan la capacidad del suelo para cumplir funciones ecológicas, productivas y ambientales, especialmente en condiciones de contaminación por metales pesados (MINAM, 2016).	aluará mediante análisis de laboratorio antes y después del tratamiento, determinando parámetros físicos, químicos de fertilidad, degradación y concentración de metales pesados totales.	Físicos: Arena, Arcilla, Limo. Químicos de Fertilidad y Nutrición: pH, Materia Orgánica, Calcio, Fósforo, Nitrógeno Total. Químicos de Degradación: Conductividad Eléctrica (CE), Sodio Intercambiable (Na). Contaminantes: Cadmio (Cd), Plomo (Pb).	% % cmol(+)/kg ppm dS/m cmol(+)/kg ppm	Numérica Continua

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación se clasificó según cuatro criterios metodológicos:

Según la intervención del investigador: El estudio fue experimental (con intervención), ya que se manipuló deliberadamente la variable independiente (dosis de biochar) para observar su efecto sobre la calidad del suelo.

Según el control de las mediciones: El estudio fue prospectivo, debido a que los datos se planificaron y recolectaron a partir de mediciones realizadas por el investigador para los fines específicos del estudio, constituyendo datos primarios.

Según el número de mediciones: La investigación fue longitudinal, ya que las variables de la calidad del suelo se midieron en más de una ocasión (un pre-test y cinco post-tests), lo que permitió analizar su evolución en el tiempo.

Según el número de variables de análisis: El estudio fue analítico, puesto que se evaluó la relación de causalidad entre una variable independiente (dosis de biochar) y múltiples variables dependientes (los indicadores de la calidad del suelo), tal como se plantea en el enunciado (Supo y Zacarías, 2020).

3.1.1 ENFOQUE

El enfoque del estudio fue cuantitativo esto se debe a que los resultados obtenidos van a ser consecuencia de mediciones realizadas in situ, abarca el nivel explicativo, utilizando un diseño experimental donde se utiliza la estadística inferencial y se tienen variables objetivas. (Supo y Zacarías, 2020).

3.1.2 ALCANCE O NIVEL

El estudio pertenece al nivel explicativo, ya que se enfocó en demostrar una relación de causalidad entre las variables. El propósito de la investigación fue verificar cómo una variable independiente (la causa), en este caso la aplicación de diferentes dosis de biochar, generaba un efecto medible sobre un conjunto de variables dependientes (los indicadores de la calidad del suelo). Al manipular deliberadamente las dosis y comparar los resultados entre los grupos, se buscó explicar de qué manera y con qué magnitud la intervención producía cambios en las propiedades fisicoquímicas y en la concentración de contaminantes del suelo.

3.1.3 DISEÑO METODOLÓGICO

El diseño del estudio fue de tipo experimental, ya que se manipuló deliberadamente la variable independiente (dosis de biochar) para medir su efecto sobre las variables dependientes (los indicadores de la calidad del suelo).

Los diseños experimentales se clasifican en tres categorías: experimentos verdaderos, cuasiexperimentos y preexperimentos. Dentro de esta clasificación, la presente investigación corresponde a un experimento verdadero, debido a que cumplió con el requisito fundamental de la asignación aleatoria de las unidades experimentales, las muestras de suelo a los diferentes grupos de tratamiento.

Específicamente, se empleó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con mediciones antes y después de la intervención (pre-test y post-test), lo que permitió comparar la evolución de los grupos y establecer con mayor rigor la relación causa-efecto entre la aplicación del biochar y los cambios en la calidad del suelo (Supo y Zacarías, 2020).

El diseño del estudio tuvo el siguiente modelo:

GE1: O₁ ——— X₁ ——— (O₂ O₃ O₄ O₅ O₆)

GE2: O₁ ——— X₂ ——— (O₇ O₈ O₉ O₁₀ O₁₁)

Leyenda

GE1: Grupo Experimental 1 (Dosis 15%).

GE2: Grupo Experimental 2 (Dosis 30%).

O₁: Observación Pre-Test.

X₁: Aplicación del Tratamiento 1 (Biochar de Aliso al 15%).

X₂: Aplicación del Tratamiento 2 (Biochar de Aliso al 30%).

(O₂...O₆): Serie de 5 Observaciones Post-Test para el Grupo 1.

(O₇...O₁₁): Serie de 5 Observaciones Post-Test para el Grupo 2.

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1 POBLACIÓN

La población de estudio de la investigación comprende el suelo agrícola contaminado por metales pesados (pb y cd) de los cuales la cantidad que se vio del suelo contaminado que se utilizó es de 100 m² con una profundidad de 50 cm, la cual lo encontramos ubicado en el Centro Poblado de San Juan de Marambuco, situado en el distrito de Santa María del Valle, provincia y departamento de Huánuco, Perú. Las coordenadas de ubicación se muestran a continuación.

Tabla 8

Ubicación del proyecto

COORDENADAS UTM-WGS 84			
Suelo	Longitud	Latitud	Altitud
	76° 12' 00" O.	09° 50' 00" S.	2,457 m.s.n.m.

Nota. La ubicación se representa en el Anexo 2.

3.2.2 MUESTRA

La población de estudio correspondió a 30 m² de suelo contaminado con metales pesados. La muestra fue seleccionada mediante muestreo no probabilístico por criterio. Primero se tomó una porción del suelo para realizar la caracterización inicial o pre-test. Luego, el suelo restante se dividió en dos tratamientos: uno con 15 % de biochar y otro con 30 % de biochar. Finalmente, de cada tratamiento se tomaron muestras en cinco momentos diferentes para evaluar los cambios durante el experimento.

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La técnica de observación fue fundamental en la presente investigación, ya que permitió observar de manera directa el comportamiento del suelo durante la aplicación de las diferentes dosis de biochar de aliso (*Alnus acuminata*), registrando los cambios en sus propiedades físicas, químicos de fertilidad, nutrición y químicos de degradación a lo largo del desarrollo de la investigación.

Tabla 9

Indicadores de recolección de datos.

Variable	Indicadores	Técnica	Equipos
Calidad del suelo	Propiedades Físicos		
	Arena		Hidrómetro
	Limo		Hidrómetro
	Arcilla		Hidrómetro
	Propiedades Químicos		
	Ph		Phmetro
	Nitrógeno		Manómetro
	Materia Orgánica	Observacion	Calcímetro
	P disponible		Fotómetro
	K disponible		Fotómetro
	CIC		Phmetro
	Ca		Balanza Analítica
	Mg		Balanza Analítica
	Na		Balanza Analítica

Nota. Se muestra a continuación un cuadro de indicadores, técnica e instrumentos para la recolección de datos.

Procedimiento de toma de muestras:

Se procedió realizar realizó en concordancia con la guía para el muestreo de suelos (MINAM, 2014).

Tabla 10

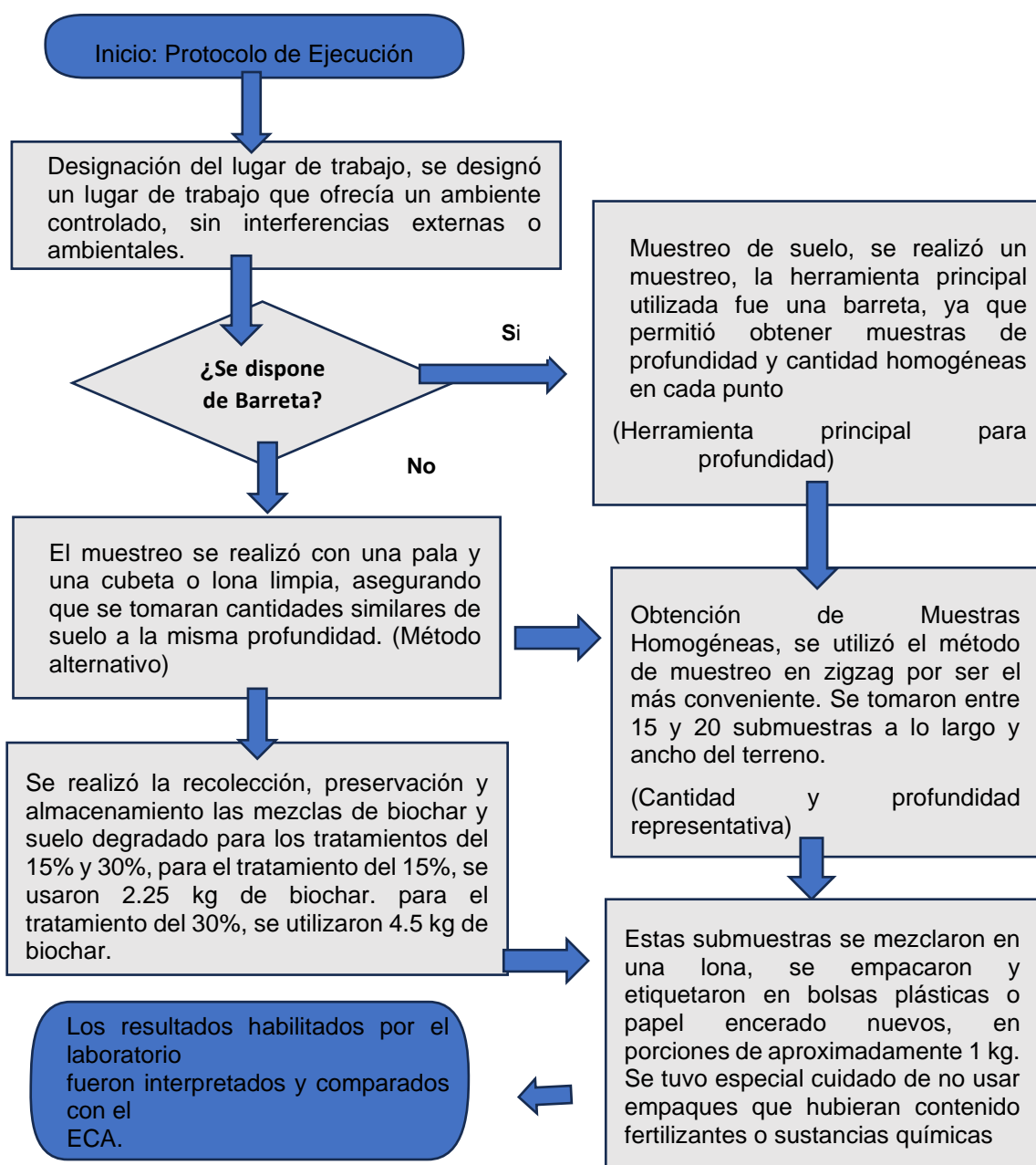
Profundidad del muestreo según el uso del suelo.

USOS DEL SUELO	PROFUNDIDAD DEL MUESTREO
Suelo Agrícola	0-50 cm

Nota. Guía para el muestreo de suelos (MINAM, 2014)

Figura 13

Flujograma: Protocolo de ejecución



3.4 TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La hermenéutica constituye una alternativa metodológica centrada en el análisis y desarrollo de textos, orientada a la comprensión e interpretación tanto en sentido general como en el ámbito específico de la interpretación textual. Este enfoque implica un proceso dialéctico en el que el investigador transita constantemente entre las partes y el todo del texto, permitiendo alcanzar una comprensión integral. Este proceso es conocido como el círculo hermenéutico, el cual sostiene que el significado global se construye a partir de la relación dinámica entre cada fragmento y la totalidad del contenido.

Por otro lado, el software IBM SPSS Statistics fue utilizado para el análisis estadístico de los datos. Este programa permitió realizar pruebas de hipótesis, calcular medidas descriptivas como la varianza y las medidas de tendencia central, así como aplicar pruebas de normalidad para evaluar la asimetría y la forma de la distribución de los datos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DESCRIPTIVOS

Tabla 11

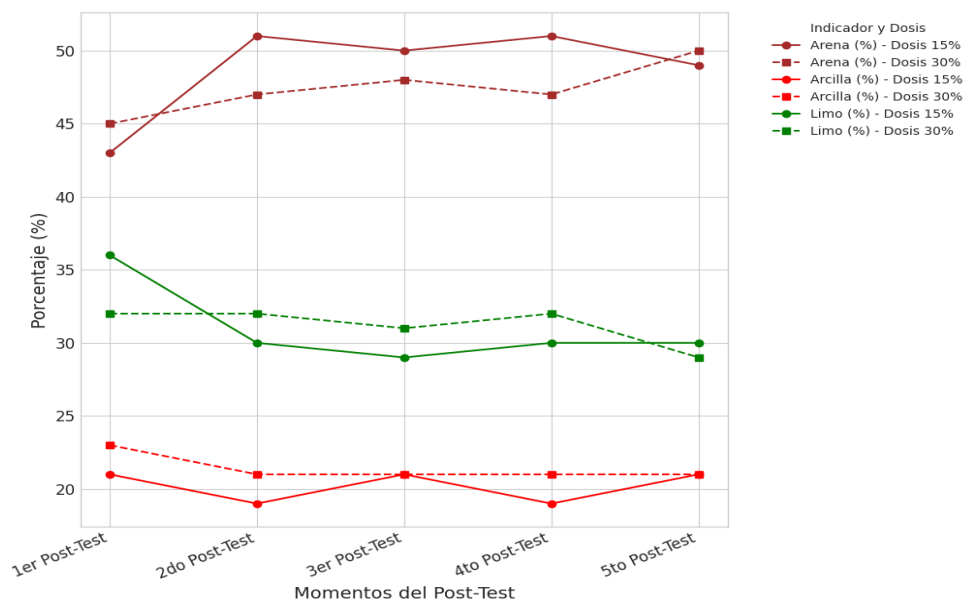
Análisis de los parámetros físicos del suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.

Indicador	Tratamiento (%)	Pre-Test	Post-Test 1	Post-Test 2	Post-Test 3	Post-Test 4	Post-Test 5
Arena (%)	15	39	43	51	50	51	49
Arena (%)	30	39	45	47	48	47	50
Arcilla (%)	15	21	21	19	21	19	21
Arcilla (%)	30	21	23	21	21	21	21
Limo (%)	15	40	36	30	29	30	30
Limo (%)	30	40	32	32	31	32	29

Nota. En la tabla se observa los cambios en la estructura del suelo tras la aplicación del biochar, se resalta cómo este tratamiento logra modificar la organización de sus componentes físicos para devolverle su equilibrio. Inicialmente, el suelo presentaba una distribución casi equitativa entre la arena (39%) y limo (40%), pero con la remediación, se produjo una transformación, ya que el contenido de arena ascendió hasta cerca del 50%, mientras que el limo disminuyó hasta 30%. Este fenómeno es positivo, ya que sugiere que el biochar ayuda a agrupar las partículas, mejorando la porosidad y la capacidad del suelo para cumplir sus funciones vitales. Por otro lado, la fracción de arcilla se mantuvo estable, rondando siempre el 21%, lo que demuestra que la estructura fundamental del suelo no se ve alterada, sino que se reorganiza para mejorar su calidad física.

Figura 14

Caracterización de los parámetros físicos del suelo contaminado por metales pesados durante la remediación con diferentes dosis de biochar.



Nota. El gráfico nos ofrece una historia visual clara y directa de los cambios texturales, confirmando lo observado en la tabla. El impacto más evidente del tratamiento se observa entre el estado Pre-Test y las primeras dos mediciones del Post-Test. Después de este cambio inicial, las proporciones de los tres componentes tienden a estabilizarse. Las líneas marrones (Arena) muestran un claro salto hacia arriba, indicando que ambos tratamientos aumentaron el porcentaje de arena durante todo el experimento. En contraste, las líneas verdes (Limo) muestran un salto descendente igualmente claro, confirmando la reducción de esta fracción en el suelo. Las líneas rojas (Arcilla) se comportan de manera muy plana, casi horizontal, lo que refuerza la idea de que la arcilla no fue significativamente afectada por los tratamientos.

Tabla 12

Análisis de los indicadores químicos de fertilidad y nutrición en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.

Indicador	Tratamiento (%)	Pre-Test	Post-Test 1	Post-Test 2	Post-Test 3	Post-Test 4	Post-Test 5
pH	15	4.76	6.68	6.67	6.67	6.65	6.64
pH	30	4.76	6.65	6.65	6.65	6.64	6.69
M.O. (%)	15	1.08	1.25	1.24	1.25	1.24	1.26
M.O. (%)	30	1.08	1.34	1.33	1.32	1.31	1.34
N total (%)	15	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
N total (%)	30	0.05	0.067	0.07	0.07	0.07	0.07
P (ppm)	15	45.3	39.32	9.31	9.31	9.27	9.31
P (ppm)	30	45.3	10.21	10.19	10.19	10.12	10.19
K ₂ O (ppm)	15	95.2	118.45	118.2	118.2	117.27	118.2
K ₂ O (ppm)	30	95.2	121.8	122.12	122.12	123.59	122.12
Ca (cmol(+)/kg)	15	4.78	37.89	57.88	87.88	77.85	87.92
Ca (cmol(+)/kg)	30	4.78	38.79	78.71	88.71	88.69	78.73
Mg (cmol(+)/kg)	15	0.613	0.849	0.843	0.843	0.831	0.845
Mg (cmol(+)/kg)	30	0.613	0.952	0.948	0.948	0.947	0.988
K (cmol(+)/kg)	15	0.315	0.197	0.193	0.193	0.19	0.199
K (cmol(+)/kg)	30	0.315	0.264	0.261	0.261	0.26	0.267

Nota. En la tabla se observa que la aplicación del biochar de aliso funcionó como un motor de cambio para la salud química del suelo, logrando rescatarlo de una acidez extrema. Se dio la neutralización del pH, que pasó de un estado muy ácido a uno casi neutro, devolviéndole al suelo las condiciones ideales para que la vida prospere. Este cambio vino acompañado de una mejora gradual en la materia orgánica y el nitrógeno, lo que nos indica que el tratamiento ayuda a reconstruir las reservas de energía que el suelo había perdido por la contaminación. Se observó también un aumento en los niveles de calcio y la mejora en el potasio y magnesio, elementos que son fundamentales para la nutrición de cualquier planta. Aunque se observó un descenso en el fósforo, el balance general es sumamente positivo, ya que el biochar logró convertir un suelo debilitado en un sustrato mucho más rico y equilibrado. Estos cambios demuestran que el suelo no solo se limpió de metales, sino que recuperó su capacidad natural para alimentar y sostener la vida de manera sostenible.

Tabla 13

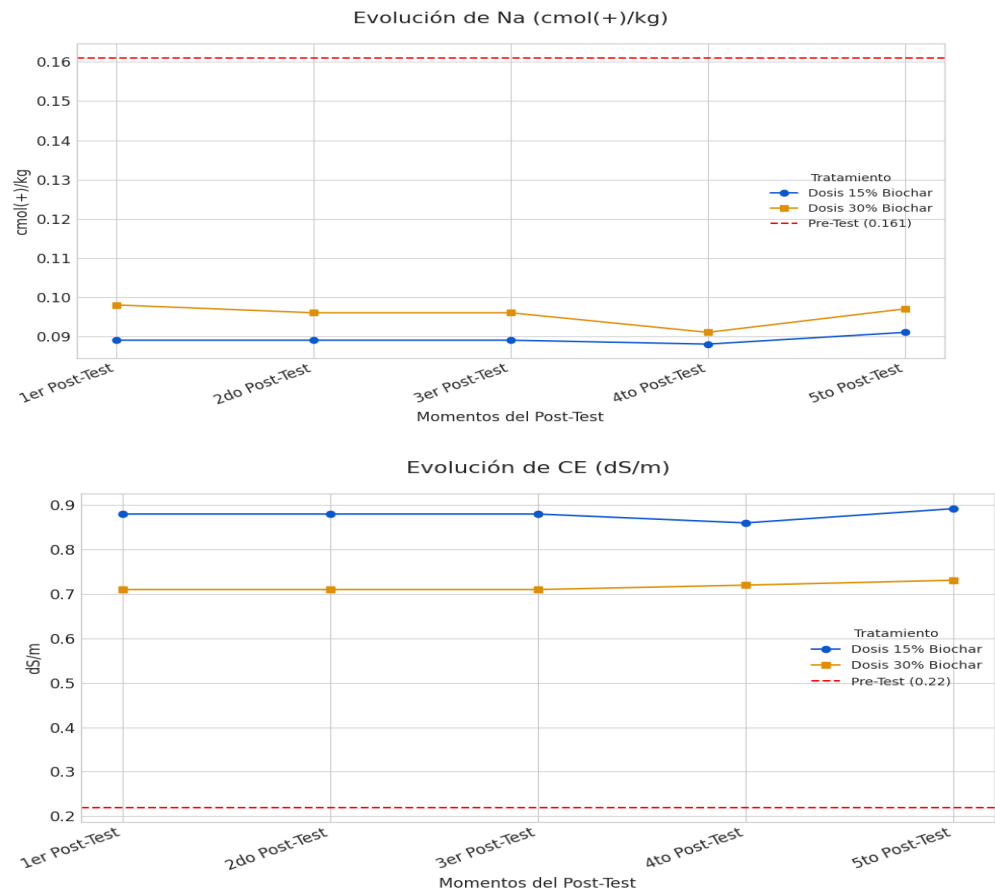
Análisis de los indicadores químicos de degradación en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.

Indicador	Tratamiento (%)	Pre-Test	Post-Test 1	Post-Test 2	Post-Test 3	Post-Test 4	Post-Test 5
CE (dS/m)	15	0.22	0.88	0.88	0.88	0.86	0.892
CE (dS/m)	30	0.22	0.71	0.71	0.71	0.72	0.731
Na (cmol(+)/kg)	15	0.161	0.089	0.089	0.089	0.088	0.091
Na (cmol(+)/kg)	30	0.161	0.098	0.096	0.096	0.091	0.097

Nota. En la tabla se tiene que, los indicadores de degradación revelan un comportamiento equilibrado tras la remediación, donde el biochar actuó como un regulador de la salinidad y un protector de la estructura del suelo. Inicialmente, la conductividad eléctrica (CE) presentaba valores muy bajos de 0.22 dS/m², pero con el tratamiento se observó un incremento que se estabilizó cerca de los 0.88 dS/m² para la dosis menor y 0.72 dS/m² para la mayor; este aumento no llega a niveles perjudiciales y responde al aporte natural de sales del propio carbón vegetal. En contraste, el sodio intercambiable (Na) mostró una reducción favorable, disminuyendo casi a la mitad de su valor inicial (de 0.161 a aproximadamente 0.09 cmol(+) kg⁻¹). Este descenso es clave para la salud del suelo, ya que minimiza el riesgo de sodicidad y protege la arquitectura física de la superficie, garantizando que el proceso de remediación no comprometa la calidad del terreno a largo plazo.

Figura 15

Análisis de los indicadores químicos de degradación en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.



Nota. En la figura, el análisis visual de las tendencias confirma que la aplicación de biochar genera una respuesta inmediata y duradera en la composición química del suelo. En el caso de la conductividad eléctrica, se observa un salto vertical desde los niveles iniciales de 0.22 dS/m² hacia una meseta superior que se mantiene constante durante todo el estudio; este comportamiento evidencia que el carbón vegetal actúa como una fuente de sales solubles que se integran al sistema desde el primer contacto. Por el contrario, el sodio intercambiable describe una trayectoria opuesta y positiva. La caída drástica desde el valor del pre-test hacia niveles inferiores y estables (cerca de 0.09 cmol(+) kg⁻¹) demuestra gráficamente el efecto protector del biochar. Esta reducción sostenida del sodio es fundamental para la recuperación de la salud del suelo, ya que alivia la presión química sobre su estructura y previene futuros procesos de degradación, permitiendo que el suelo recupere su estabilidad natural para el desarrollo de la vida.

Tabla 14

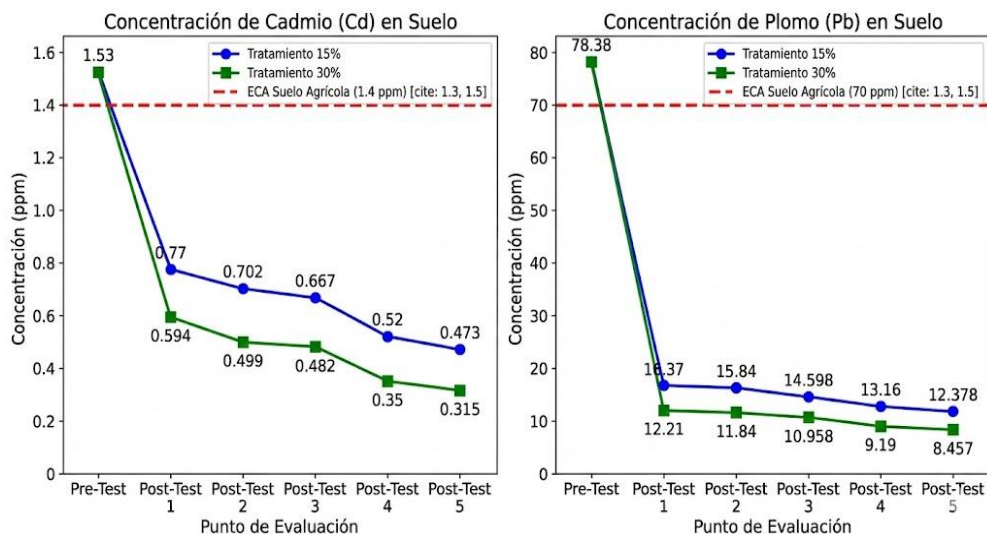
Comparación de las concentraciones de metales pesados (cadmio y plomo) en el suelo entre los diferentes tratamientos para determinar la dosis más efectiva.

Indicador	Tratamiento (%)	Pre-Test	Post-Test 1	Post-Test 2	Post-Test 3	Post-Test 4	Post-Test 5
Cd total (ppm)	15	1.53	0.77	0.702	0.687	0.52	0.473
Cd total (ppm)	30	1.53	0.594	0.499	0.482	0.36	0.315
Pb total (ppm)	15	78.38	16.37	15.84	14.598	13.16	12.378
Pb total (ppm)	30	78.38	12.21	11.84	10.958	9.19	8.457

Nota. En la tabla se tiene que, los resultados finales confirman que el biochar de aliso es una herramienta eficaz para mitigar la presencia de metales pesados en el suelo, mostrando una tendencia de limpieza progresiva en ambos contaminantes. En el caso del cadmio, que inició con 1.53 mg kg^{-1} , se observa una reducción drástica desde la primera etapa de tratamiento. La dosis al 15% logró disminuir la concentración hasta 0.473 mg kg^{-1} , fue la dosis al 30% la que demostró una mayor potencia remediadora, alcanzando un valor final de apenas 0.315 mg kg^{-1} . Este comportamiento indica que, una mayor cantidad de carbón vegetal acelera la captura de este metal, reduciendo su presencia a menos de una cuarta parte del nivel original. Respecto al plomo, se partió de una contaminación crítica de 78.38 mg kg^{-1} , se aprecia que ambos tratamientos lograron reducir los niveles de forma sostenida. La dosis del 30% sobresalió por su eficiencia al culminar el estudio con 8.457 mg kg^{-1} , frente a los $12.378 \text{ mg kg}^{-1}$ obtenidos con la dosis menor.

Figura 16

Evolución de la concentración de metales pesados en el suelo y comparación con ECA



Nota. De acuerdo con el Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM, que establece los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo en Perú, el análisis de la gráfica revela que el suelo inicialmente presentaba una condición de contaminación crítica al superar los límites permitidos para uso agrícola, establecidos en 1.4 ppm para cadmio y 70 ppm para plomo. En el estado de Pre-Test, las concentraciones de cadmio (1.53 ppm) y plomo (78.38 ppm) excedían dicho marco legal, pero tras la aplicación de los tratamientos se observa una reducción inmediata y sostenida que logra situar ambos metales muy por debajo de los niveles máximos permitidos desde el primer post-test. Al finalizar el estudio, la dosis del 30% demostró la mayor eficiencia remediadora al estabilizar los niveles en 0.315 ppm para Cd y 8.457 ppm para Pb, valores que garantizan plenamente el cumplimiento de la normativa ambiental vigente y la recuperación de la aptitud del suelo para actividades agrícolas según los estándares del Ministerio del Ambiente.

Tabla 15*Prueba de normalidad con Shapiro-Wilk*

Indicador	Sig. (15%)	Sig. (15%)	Sig. (30%)	Sig. (30%)	Distribución
Arena	0.812	0.03	0.961	0.826	No Normal
Arcilla	0.732	0.006	0.612	0	No Normal
Limo	0.725	0.005	0.791	0.021	No Normal
pH	0.902	0.49	0.784	0.018	No Normal
M.O.	0.871	0.314	0.898	0.421	Normal
N total	0.999	1	0.584	0	No Normal
K ₂ O	0.795	0.022	0.763	0.012	No Normal
Ca	0.864	0.275	0.796	0.023	No Normal
Cd total	0.895	0.404	0.948	0.736	Normal
Pb total	0.941	0.66	0.912	0.457	Normal

Nota. La tabla nos muestra la normalidad de los datos. En indicadores como la materia orgánica y los metales pesados (cadmio y plomo), los resultados mostraron un comportamiento normal, lo que permite usar la prueba t de Student para compararlos. Sin embargo, en otros parámetros como la textura del suelo y el pH, los datos resultaron más irregulares o no normales, por lo que es pertinente el uso de la prueba U de Mann-Whitney para el análisis.

4.2 CONTRASTACIÓN Y PRUEBA DE HIPÓTESIS

Hi: Existe diferencia en el efecto remediador de dosis del biochar de aliso en la calidad del suelo contaminado por metales pesados.

H0: No existe diferencia en el efecto remediador de dosis del biochar de aliso en la calidad del suelo contaminado por metales pesados.

Tabla 16

Prueba de hipótesis

		Prueba de Levene para igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias			95% Intervalo de confianza		
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	Inferior/Superior
M.O. (%)	Se han asumido varianzas iguales	0.787	0.347	-6.54	10	0.000	-0.085	0.013	-0.114 -0.056
Na (cmol(+) kg^{-1})	Se han asumido varianzas iguales	0.821	0.351	4.82	10	0.001	0.068	0.014	0.036 0.1
Cd total (ppm)	Se han asumido varianzas iguales	0.642	0.823	2.29	10	0.045	0.158	0.069	0.004 0.312
Pb total (ppm)	Se han asumido varianzas iguales	0.558	0.926	3.48	10	0.006	3.92	1.12	1.41 6.42

Nota. La tabla confirma que la dosis de biochar influye de manera determinante en los resultados finales. Al observar la columna de Sig. (bilateral), vemos valores menores a 0.05 en todos los casos. Esto significa que, en la limpieza de metales existe una diferencia real y probada entre ambas dosis, siendo la del 30% significativamente más eficiente para capturar el Cadmio y el Plomo del suelo. La dosis del 30% aporta una mejora en la Materia Orgánica esto está asociado a una mayor cantidad de biochar en el sistema. La reducción del sodio es estadísticamente superior con la dosis más alta, lo que garantiza una mejor estabilidad física del terreno a largo plazo. Con esta evidencia, podemos afirmar que aumentar la dosis de biochar al 30% potencia significativamente la capacidad remediadora y nutritiva de los suelos contaminados en la zona de estudio.

Tabla 17*Comparación del efecto de la remediación con las diferentes dosis*

Indicador	Valor Normativo	Valor Pre-Test	Cumplimiento (Pre-Test)	Valor Post-Test(15%)	Cumplimiento (Post-Test 15%)	Valor Post-Test (30%)	Cumplimiento (Post-Test 30%)
Contaminantes							
Cadmio Total (Cd)	1.4 ppm (ECA Suelo Agrícola)	1.53 ppm	No Cumple	0.473 ppm	Sí Cumple	0.315 ppm	Sí Cumple
Plomo Total (Pb)	70 ppm (ECA Suelo Agrícola)	78.38 ppm	No Cumple	12.378 ppm	Sí Cumple	8.457 ppm	Sí Cumple
Químicos de degradación							
pH	5.5 - 7.5 (Rango ideal, FAO)	4.76	No Cumple	6.64	Sí Cumple	6.69	Sí Cumple
CE (dS/m)	< 2.0 dS/m (Suelo no salino, FAO)	0.22	Sí Cumple	0.892	Sí Cumple	0.731	Sí Cumple
Na (cmol(+)/kg)	Bajo (Ideal <1.0)	0.161	Sí Cumple	0.091	Sí Cumple	0.097	Sí Cumple
Químicos de fertilidad							
M.O. (%)	> 2% (Nivel adecuado)	1.08%	No Cumple	1.26%	No Cumple	1.34%	No Cumple
Ca (cmol(+)/kg)	> 5 (Nivel adecuado)	4.78	No Cumple	87.92	Sí Cumple	78.73	Sí Cumple
Mg (cmol(+)/kg)	> 0.8 (Nivel adecuado)	0.613	No Cumple	0.845	Sí Cumple	0.988	Sí Cumple
P (ppm)	15 - 30 (Nivel adecuado)	45.3	No Cumple	9.31	No Cumple	10.19	No Cumple
K ₂ O (ppm)	> 100 (Nivel adecuado)	95.2	No Cumple	118.2	Sí Cumple	122.12	Sí Cumple
Parámetros físicos							
Clase Textural	Franco (Textura ideal)	Franco	Sí Cumple	Franco	Sí Cumple	Franco	Sí Cumple

Nota. Datos procesados con IBM SPSS versión 26.

El análisis comparativo final demuestra que el suelo pasó de un estado de contaminación crítica a uno de cumplimiento legal y con recuperación funcional. Inicialmente, el suelo no era apto para la agricultura según los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de Perú, al superar los límites de Cadmio (1.53 mg kg^{-1}) y Plomo (78.38 mg kg^{-1}), además de presentar una acidez extrema (4.76) y deficiencias en nutrientes esenciales. Tras la aplicación del biochar, ambas dosis (15% y 30%) lograron con éxito que el suelo cumpla con la normativa ambiental, reduciendo los metales pesados muy por debajo de los límites permitidos y estabilizando el pH en rangos óptimos. Si bien ambos tratamientos rescataron la fertilidad al elevar los niveles de Calcio, Magnesio y Potasio, la dosis del 30% se consolidó como la más efectiva. Esta no solo alcanzó una limpieza más profunda de los contaminantes, sino que ofreció una mejora superior en la materia orgánica, devolviendo al suelo una calidad integral más sólida para su uso productivo.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo general de esta investigación fue demostrar el efecto remediador de diferentes dosis de biochar de aliso (*Alnus acuminata*) sobre la calidad del suelo contaminado por metales pesados. Los resultados demuestran de manera concluyente que la aplicación de biochar tuvo un efecto remediador integral y positivo. El hallazgo principal es que el suelo, que inicialmente superaba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) peruanos para Cadmio (Cd) y Plomo (Pb), fue remediado exitosamente, llevando las concentraciones de ambos metales por debajo de los límites máximos permisibles. Adicionalmente, se observó una mejora significativa en múltiples indicadores agronómicos, destacando la neutralización de la acidez del pH y el incremento en los niveles de Calcio y Magnesio.

Estos hallazgos guardan una fuerte coincidencia con los antecedentes citados. El éxito en la inmovilización de metales pesados es consistente con lo reportado a nivel nacional por Gómez (2021), quien, utilizando biochar de eucalipto, logró una alta eficiencia en la retención de Plomo en relaves mineros en Cajamarca. La mejora del pH, que en nuestro estudio pasó de 4.28 a un nivel casi neutro, es uno de los efectos más documentados del biochar y se alinea directamente con los hallazgos de Ramos (2022) en Huánuco, quienes también reportaron una estabilización de la acidez del suelo tras la aplicación de la enmienda. De igual manera, las mejoras generales en las propiedades del suelo son respaldadas por Quiroz (2021), quien observó una potencialización significativa en la rehabilitación de superficies afectadas por metales.

Desde el punto de vista teórico, el éxito de la remediación se explica por los mecanismos de acción del biochar. El aumento del pH es un factor clave, ya que la alcalinidad del biochar neutraliza la acidez del suelo, lo que a su vez disminuye la solubilidad y biodisponibilidad de los metales pesados. La mejora en la fertilidad puede deberse a que el biochar incrementa la reacción de los nutrientes al promover la actividad microbiana que facilita su absorción.

El primer objetivo específico fue analizar el efecto de los parámetros físicos del suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar. El principal hallazgo fue que la aplicación de biochar indujo un cambio en la composición textural del suelo. Se observó una disminución consistente en la fracción de limo y un correspondiente aumento en la fracción de arena para ambas dosis, mientras que el porcentaje de arcilla se mantuvo notablemente estable a lo largo del estudio. A pesar de estas variaciones en las proporciones de las partículas, la clase textural general del suelo se mantuvo como Franco tanto antes como después de la remediación.

Este resultado es coherente con los mecanismos de acción del biochar y encuentra respaldo en los antecedentes. Aunque la mayoría de los estudios citados se centran en los efectos químicos, Quiroz (2021) menciona una mejora general en las propiedades fisicoquímicas de las superficies tratadas, lo cual es consistente con los cambios observados en la textura de nuestro suelo.

Desde el punto de vista teórico, el cambio en la composición textural se explica por la incorporación de un nuevo material sólido al suelo. El biochar, compuesto por partículas carbonosas de tamaño generalmente grueso, actúa de manera similar a las partículas de arena. Al agregarlo al suelo, se diluye la proporción de las partículas más finas existentes, como el limo, y se incrementa la proporción de partículas de tamaño arena, lo que explica el aumento observado en esta fracción.

El segundo objetivo específico fue explicar el efecto de los indicadores químicos de fertilidad y nutrición en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar. El hallazgo más destacado fue la corrección drástica de la acidez, con el pH aumentando de un nivel extremadamente ácido de 4.76 a un rango casi neutro (≈ 6.7), se registraron incrementos en Calcio (Ca), y aumentos superiores con la dosis del 30% para Materia Orgánica (M.O.), Nitrógeno (N), Magnesio (Mg) y Potasio disponible (K_2O). De forma contrastante, se observó una disminución en los niveles de Fósforo (P) y Potasio intercambiable (K).

Estos hallazgos son consistentes con la literatura científica citada en esta tesis. El efecto neutralizante del pH es uno de los resultados más robustos y coincide directamente con lo reportado por Guerrero (2021), quien también observó un incremento significativo del pH en suelos ácidos de Puno, y con el estudio local de Ramos (2022) en Huánuco, partiendo de un pH muy similar (4.28), también logró equilibrarlo con biochar. La mejora en la fertilidad general es respaldada por múltiples autores, concluyeron que el biochar mejora la condición edáfica del suelo, actuando como fertilizante.

Desde una perspectiva teórica, el incremento en M.O. y N se debe al aporte directo del material carbonoso. La disminución del Fósforo, aunque pueda parecer contradictoria, también tiene una explicación teórica sólida: al elevar el pH a niveles neutros y aumentar masivamente la concentración de Calcio, es altamente probable que el Fósforo haya precipitado en forma de fosfatos de calcio, volviéndose menos soluble y, por lo tanto, menos detectable en el análisis de suelo.

El tercer objetivo específico fue evaluar el efecto de los indicadores químicos de degradación en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar. La aplicación de biochar, en ambas dosis, provocó un aumento notable en la Conductividad Eléctrica (CE), llevándola de 0.22 dS/m a un rango estable de $\approx 0.7-0.9$ dS/m. Por otro lado, se observó un efecto beneficioso en la reducción del Sodio Intercambiable (Na), que disminuyó a casi la mitad de su valor inicial.

Estos hallazgos son consistentes con parte de la literatura citada. El incremento de la CE coincide directamente con lo reportado por Ramirez (2023), quien también registró un crecimiento en la conductividad eléctrica tras la aplicación de biochar. Sin embargo, nuestro resultado contrasta con el de Gómez (2021), quien en su estudio encontró que las dosis más altas de biochar proporcionaron una conductividad eléctrica más baja. Esta aparente contradicción puede ser una de las fortalezas de la discusión, ya que evidencia que el efecto del biochar sobre la CE no es universal y depende en gran medida del material de origen (la biomasa) y del proceso de pirólisis, los cuales determinan el contenido final de cenizas y sales solubles en la enmienda.

El cuarto objetivo específico fue comparar la concentración de metales pesados (cadmio y plomo) en el suelo antes y después de la aplicación de diferentes dosis de biochar. Los resultados demuestran que ambos tratamientos con biochar de aliso lograron una reducción drástica y estadísticamente significativa en las concentraciones de ambos contaminantes. El suelo, que inicialmente no cumplía con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), fue remediado exitosamente a niveles por debajo de los límites permitidos. El análisis comparativo reveló que la dosis del 30% fue más efectiva que la dosis del 15%, logrando una concentración final de Cadmio (Cd) de 0.315 ppm y de Plomo (Pb) de 8.457 ppm, frente a los 0.473 ppm y 12.378 ppm de la dosis del 15%.

Estos hallazgos son consistentes y se ven respaldados por los antecedentes citados. A nivel nacional, la investigación de Gómez (2021) es particularmente relevante, ya que también se enfocó en la inmovilización de Plomo en suelos de relave minero en Perú, concluyendo que el biochar de eucalipto tiene una alta eficiencia de retención (alrededor del 64%).

El éxito de la remediación se explica a través de los mecanismos teóricos descritos en el marco de esta tesis. La alta porosidad y superficie específica del biochar promueven la adsorción, un proceso mediante el cual los iones metálicos quedan atrapados físicamente en la estructura del carbón. Finalmente, el aumento de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo, evidenciado por el masivo incremento de Calcio y Magnesio, significa que hay más sitios con carga negativa en el suelo capaces de retener y fijar los metales pesados, impidiendo su libre circulación.

Los resultados para este objetivo son la culminación del estudio. Demuestran que el biochar de aliso no solo funciona, sino que existe una clara relación dosis-respuesta donde una mayor cantidad de enmienda conduce a una mejor remediación. La dosis del 30% no solo redujo más los contaminantes, sino que lo hizo de manera más rápida y eficiente, especialmente para el Cadmio. Por lo tanto, se puede concluir que para suelos con niveles de contaminación similares a los de este estudio, la dosis del 30% es la opción superior y más recomendable para garantizar el cumplimiento de la normativa ambiental y una recuperación más completa del suelo.

CONCLUSIONES

La aplicación de biochar de aliso (*Alnus acuminata*) tuvo un efecto remediador integral y positivo sobre la calidad del suelo contaminado con metales pesados. Se demostró que la dosis del 30% fue la más efectiva, logrando no solo la reducción de las concentraciones de Cadmio y Plomo por debajo de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) vigentes, sino también una mejora significativa en las propiedades agronómicas del suelo, destacando la neutralización de la acidez y el incremento de nutrientes clave.

La aplicación de biochar de aliso modificó los parámetros físicos del suelo, induciendo un cambio en la composición textural caracterizado por una disminución en la fracción de limo y un aumento en la fracción de arena. A pesar de esta alteración, la clase textural general del suelo se mantuvo como Franco, conservando una característica física deseable para fines agrícolas.

Se determinó que el biochar de aliso tuvo un efecto significativamente en los indicadores de fertilidad y nutrición, el efecto más notable fue la corrección de la acidez extrema, elevando el pH a un nivel casi neutro. Asimismo, se registraron incrementos sustanciales en los niveles de Calcio, Magnesio, Potasio disponible, Materia Orgánica y Nitrógeno. No obstante, se observó una disminución considerable en la concentración de Fósforo disponible, lo que indica un efecto de fijación de este nutriente.

La evaluación de los indicadores de químicos de degradación reveló un efecto dual: la aplicación de biochar incrementó la Conductividad Eléctrica (CE), aunque manteniéndola dentro de niveles no salinos, y al mismo tiempo, redujo significativamente la concentración de Sodio intercambiable (Na), mejorando así la estabilidad estructural del suelo y disminuyendo el riesgo de sodicidad.

Al comparar los tratamientos, se concluyó que la dosis del 30% de biochar de aliso fue la más efectiva para la remediación de metales pesados. Este tratamiento logró una reducción estadísticamente significativa y mayor en las concentraciones finales tanto de Cadmio como de Plomo en comparación con la dosis del 15%, estableciéndose como la dosificación superior para los objetivos de descontaminación de este estudio.

RECOMENDACIONES

Para proyectos futuros de remediación de suelos con características y niveles de contaminación de Plomo y Cadmio similares a los de este estudio, se recomienda la aplicación de biochar de aliso (*Alnus acuminata*) en una dosis del 30% p/p. Esta dosis demostró ser la más efectiva no solo para reducir los contaminantes a niveles seguros que cumplen con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), sino también para lograr una mejora superior en la mayoría de los indicadores de fertilidad del suelo.

Dado que se observó una disminución significativa en el indicador de químicos de fertilidad y nutrición del Fósforo disponible a niveles deficientes tras la aplicación del biochar, se recomienda que cualquier plan de remediación con esta enmienda vaya acompañado de un programa de monitoreo y enmiendas orgánicas como compost. Es crucial realizar análisis de suelo post-remediación para determinar la restauración necesaria para niveles agrónomicamente adecuados, especialmente si se planea un uso agrícola del suelo recuperado.

Realizar estudios de campo y a largo plazo (superiores a un año) para evaluar la estabilidad y permanencia del efecto remediador del biochar. Es fundamental determinar si los metales pesados permanecen inmovilizados de forma segura en la matriz del suelo o si, por el contrario, podrían volver a estar biodisponibles con el tiempo debido a cambios en las condiciones ambientales (como la meteorización del biochar o cambios en el pH).

Explorar el potencial del biochar de aliso no solo como agente remediador, sino también como enmienda para la recuperación de suelos agrícolas degradados por acidez en la región de Huánuco. Dado su potente y rápido efecto neutralizante y su origen en un recurso forestal local, podría representar una alternativa sostenible y de bajo costo para mejorar la productividad agrícola en la zona, independientemente de la presencia de metales pesados.

REFERENCIAS

- Abi-Saab R., (2012). *Evaluación de la calidad del suelo, en el sistema productivo orgánico*. La Estancia, Madrid, Cundinamarca. Utilizando indicadores de calidad de suelos. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. 93 p.
- Albert, H. & Jeyakumar, P. (Eds). (2021). *Influence of biochar and soil properties on soil and plant tissue concentrations of Cd and Pb: A meta-analysis*. *Science of The Total Environment*, 755, 142582. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142582>
- Alcaino, C. G. (2012). *Análisis y comparación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales*. (En línea). Consultado el 25 mayo 2023. http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/113010/cfalcaino_gc.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Añazco M. (1996). *Proyecto Desarrollo Forestal Campesino en los Andes del Ecuador. Aliso*. Editorial graficas Iberia. Quito- Ecuador. El aliso 7-22
- Arcos L. A. I. (2019). Universidad Central Del Ecuador. *Universidad Central Del Ecuador*, 105.
- Arranz, J. A (2015). “*Rehabilitación o remediación de espacios degradados por minería a cielo abierto: investigación, desarrollo e innovación en España*”. ResearchGate. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- Artunduaga, C. (2018) *Caracterización y análisis integral de la producción y de potencial nutricional de alnus acuminata* (PDF). Repositorio Universitario del Tolima. <https://repository.ut.edu.co/server/api/core/bitstreams/50c75aa1-1254-46dd-b9a7-57fa541ab746/content>
- Barahona, I., Zhang, J., Fu, J., Shi, J., Jiang, G. (2001). *Biomonitoring: An appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem*. *Analytica Chimica Acta*, 606: 135-150.

- Bautista, C., Etchevers, B., del Castillo, R., & Gutiérrez, C. (2004). *La calidad del suelo y sus indicadores*. México: ecosistema.
- Beltrán, E. & Gómez, A. (2016). *Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg) mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión*. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12: 172-19. DOI: <https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>
- Bouida, L., Rafatullah, M., Kerrouche, A., Qutob, M., Alosaimi, A. M., Alorfi, H. S., & Hussein, M. A. (2022). A Review on Cadmium and Lead Contamination: *Sources, Fate, Mechanism, Health Effects and Remediation Methods*. *Water*, 14(21), 3432. <https://doi.org/10.3390/w14213432>
- Cabrera, G., Y Crespo, G. (2001). *Influencia de la biota edáfica en la fertilidad de los suelos en ecosistemas de pastizales*. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, vol. 35 (1): 3-9
- Cabrera-Garavito, D. (2014). *Impacto del control fiscal ambiental en la optimización de los recursos naturales y el ambiente*. Bogotá: Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario.
- Campbell, S. (2025, 19 abril). About 15% of world's cropland polluted with toxic metals, say researchers. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/environment/2025/apr/17/about-15-world-cropland-polluted-toxic-metals-say-researchers?utm>
- Capela, I., & Jahaninafard, D. (Eds.). (2020). Scientometric analysis and scientific trends on biochar application as soil amendment. *Chemical Engineering Journal*, 395, 125128. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125128>
- Carlos, G. I. (2015). *Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo*. DIGITAL.CSIC. <https://digital.csic.es/handle/10261/111812>
- Carrillo F. (1998). *Propiedades Físicas y Mecánicas en Especies Nativas, Aliso, Arrayán, Capulí, Molle, Quishuar*. ESPOCH. RiobambaEcuador.
- Castro-Bedriñana, J., Chirinos-Peinado, D., Garcia-Olarte, E., & Quispe-Ramos, R. (2021). Lead transfer in the soil-root-plant system in a highly

- contaminated Andean area. PeerJ, 9, e10624.
<https://doi.org/10.7717/peerj.10624>
- Coatings (2025) Cadmium.org. (s.f.-b).
<https://www.cadmium.org/applications/coatings/>
- Companies, W. (2019). Dictionary of Architecture. Retrieved from The free
- Condeña E. y Romero, J. (2017). La inmovilización y retención de arsénico soluble, cadmio y zinc por biochar. Revista [En línea] vol. 159.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749110004720>
 ISSN: 0269-7491[11]
- Cordis, C. (2019). *Una revolución en el reciclado de las baterías de plomo y ácido*. CORDIS | European Commission.
<https://cordis.europa.eu/article/id/386817-a-revolution-for-lead-acid-batteries-recycling/es>
- Coria, I. D. (2015). Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. 13 abril, 1-7 <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-097.pdf>
- CORPOICA (2010) La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria el aliso (*Alnus acuminata* H.B.K.) como alternativa silvopastoril en el manejo sostenible de praderas en el trópico alto colombiano. Biblioteca Digital Agropecuaria de Colombia.
<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13489>
- Díaz, L. J. (2008). Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados. Consultado el 25 mayo 2023.
https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/2540/9788498872026_content.pdf?sequenc
- Fabian, S.(2022) Recuperación de los servicios ecosistémicos en la región huánuco y su limitada contribución. *Blog USIL*.
<https://blogs.usil.edu.pe/sostenibilidad/recuperacion-de-los-servicios-ecosistemicos-en-la-region-huanuco-y-su-limitada>
- FAO. (2015). Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse (s.f.)<https://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/>

- Febres, J. (2019). Criterios de calidad y gestión del suelo. Universidad Nacional de Educación a Distancia Madrid. <https://acortar.link/MxRpyx>
- Galán Huertos, E; Romero Baena, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*. 10 (2008):48-60
- Gómez, C. A. (2021). Aplicación de biochar para la inmovilización de plomo en suelos provenientes de los relaves mineros de paredones – Cajamarca. <http://repositorio.upagu.edu.pe/handle/UPAGU/1554>
- González, J. C. (2011). Suelos mineros asociados a la minería de carbón a cielo abierto en España: una revisión. *Boletín Geológico Minero*, 122, 3-16.
- Guía para Muestreo de Suelos. (2014). Informes y Publicaciones Ministerio del Ambiente Plataforma del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2699-guia-para-muestreo-de-suelos> .
- Guerrero O, P. (2009) Respiración De Co2 Como Indicador De La Actividad Microbiana En Abonos Orgánicos De Lupinus. *Terra Latinoam*. 30, 355–362.
- Gustin, Y., Morales-Jamioy, N., & Ortiz-Estrella, C. (2014). Evaluación de la calidad del suelo por medio de indicadores en sistemas de manejo frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), granadilla (*Passiflora ligularis*), bosque y chagras tradicionales en el municipio de Sibundoy Putumayo. Sibundoy, Putumayo: Instituto Tecnológico del Putumayo.
- He, L., Zhong, H., Liu, G., Dai, Z., Brookes, P. C., & Xu, J. (2019). Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China. *Environmental Pollution*, 252, 846-855. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.151>
- Iglesias, S. (2018). Aplicación de biochar a partir de biomasa residual de eucalipto para evaluar la productividad con maíz en el austro ecuatoriano. Tesis Doctorado en Ingeniería y Ciencias Ambientales. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima Perú. 146 pp.

- INEFAN. (1992) Instituto Ecuatoriano Forestal y de Áreas Naturales y de Vida Silvestre. Auto ecología de la Especie de Aliso. Cartilla N.-2. Quito-Ecuador.
- International Atomic Energy Agency. (2026). El OIEA y el Grupo OCP ponen en marcha una alianza para fortalecer la seguridad alimentaria mundial y la salud del suelo. *IAEA*. <https://www.iaea.org/es/newscenter/pressreleases/el-oiea-y-el-grupo-ocp-ponen-en-marcha-una-alianza-para-fortalecer-la-seguridad-alimentaria-mundial-y-la-salud-del-suelo>
- Introducción a los Suelos: *La Calidad de los Suelos*. (s.f.). <https://n9.cl/koo7j>
- Jiménez, R., & González, V. (2006). La calidad de suelos como medida para su conservación. *Edafología*, 125-138
- Julca A., Meneses L., Blas R., Bello S, (2006), La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura, *Idesia Volumen* 24(1): 49-61 p
- Kogut, P. (2025). Degradación del suelo: técnicas para evitar sus efectos. *EOS Data Analytics*. <https://eos.com/es/blog/degradacion-del-suelo/>
- Komárek, M.; Vanek, A.; Chrastny, V.; Száková, J.; Kubová, K.; Drahota, P. & Balík, J. (2009). Retention of copper originating from different fungicides in contrasting soil types. *Journal of Hazardous Materials*, 166: 1395-1402. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.061>
- Labrador, M.J., (2001). La materia orgánica en los agroecosistemas. Edición Grupo MundiPrensa. España. 293 p.
- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food And Energy Security*, 5(4), 212-222. <https://doi.org/10.1002/fes3.96>.
- Larios, M. (2014). *Niveles de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb Y Zn en los suelos de ribera de la cuenca del rio Turia*. Tesis, Universidad Autónoma de Barcelona, España. <https://digital.csic.es/handle/10261/141280>
- Lefebvre, D., Román-Dañobeytia, F. (Eds.). (2019). Biochar Effects on Two Tropical Tree Species and Its Potential as a Tool for Reforestation. *Forests*, 10(8), 678. <https://doi.org/10.3390/f10080678>

- Leguizamo, M. F., Gómez, W. D. F., & Sarmiento, M. C. G. (2017). Native herbaceous plant species with potential use in phytoremediation of heavy metals, spotlight on wetlands — A review. *Chemosphere*, 168, 1230-1247. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.075>
- Lehmann, J., Rillig, M.; Thies, J.; Masiello, C.; Hockaday, C. y Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 1812-1836. https://scholar.google.com.pe/scholar?q=10.1016/j.soilbio.2011.04.022&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar
- Liu, L., Li, W., Song, W., & Guo, M. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of The Total Environment*, 633, 206-219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
- Loján, L. (1992). El verdor de los Andes. Árboles y Arbustos Nativos para el Desarrollo Forestal Alto Andino. Quito - Ecuador.
- López, A. (2015). Manual de Edafología. Notas de Clases. Universidad de Sevilla. En <http://www.scribd.com/doc/51630897/46/Calculo-de-la-porosidad>
- Marquetti, I. G., Rodriguez, M. G., Peteira, B., & Schmidt, H. (2021). Artículo Reseña Biochar y su contribución a la nutrición, crecimiento y defensa de las plantas Biochar and. *ResearchGate*. Recuperado de <https://n9.cl/huui5>
- Materechera, S. (2009). Aggregation in a surface layer of a hardsetting and crusting soil as influenced by the application of amendments and grass mulch in a South African semi-arid environment. *Soil & Tillage Research*, 105, 251–259.
- Mendoza, E. O., Cuadrado, W., Yallico, L., Zárata, R., Quispe-Melgar, H. R., Limaymanta, C. H., Sarapura, V., & Bao-Cóndor, D. (2021b). Heavy metals in soils and edible tissues of *Lepidium meyenii* (maca) and health risk assessment in areas influenced by mining activity in the Central region of Peru. *Toxicology Reports*, 8, 1461-1470. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2021.07.016>

- Meza-Perez, E. y D. Geissert – Kientz (2006). Estabilidad de estructura en andisoles de usos forestales y cultivados. *TIERRA Latinoamericana* 24(2): 163-170.
- MINAM (2014) Descontaminación de suelos. (pág. 15) Guía para la elaboración de planes de Planes de Descontaminación de Suelos.
- MINAM (2016). Sitios Contaminados. (pág. 15) Glossary of terms Contaminated Sites.
- MINAM (2015). Reforma *texto unificado legislación secundaria, medio ambiente, libro vi, Decreto Ejecutivo 3516, Registro Oficial I Suplemento* 2. 1-75.
<https://www.ambiente.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-097.pdf>
- Montalva, C. F. (2013). Efectos de la Contaminación del Suelo en la productividad de cinco sectores agrícolas de la parroquia de Tumbaco. *Integration of Climate Protection and Cultural Heritage: Aspects in Policy and Development Plans. Free and Hanseatic City of Hamburg*, 26(4), 1-37.
- Muegue, P. A. G. (2019). Remediación de suelos alterados por actividad de minería del carbón a cielo abierto, mediante aplicación de biochar procedente de residuos biomásicos de la palma de aceite en la zona carbonífera del departamento del Cesar. Recuperado de <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/9684>
- National Academies Press (NAP). (2024). *Interactions of Soil Chemical Contaminants, Soil Health, and Human Health*. Exploring Linkages Between Soil Health And Human Health - NCBI Bookshelf. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK609355/>
- Ochoa, B. H. F. (2022). Nivel de contaminación del suelo con arsénico y metales pesados en Tiquillaca (Perú). *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 24(2), 131-138. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.416>

- Oliveira, F.; Patel, A.; Jaisi, P.; Adhikari S.; Lu, H. & Khanal, S. (2017). Environmental application of biochar: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, 246: 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.122>
- Ortega, D. (1995). Consideraciones Generales para Interpretar Análisis de Suelos. En: Suelos de Colombia, origen, evolución, clasificación, distribución y uso. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Canal Ramírez Antares Ltda. Bogotá. p. 423.
- Pandey, D., Daverey, A., & Arunachalam, K. (2020). Biochar: Production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120267>
- Parr, J., Papendick, R., Hornick, S. and Meyer, R. (1992). Soil quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*. Vol.7. p.5-11
- Pérez. G. (2010). Disponibilidad de metales tóxicos en sitios contaminados. Tesis, Universidad Autónoma de Barcelona, España. <https://ddd.uab.cat/pub/tesis/2005/tdx-0503106-000433/gpg1de2.pdf>
- Pincay-Pilay, D. A., & Carrasco, E. F. (2025). Environmental Impact of Lead-Acid Batteries: A Review of Sustainable Alternatives for Production and Recycling Based on Life Cycle Analysis. *Sustainability*, 17(23), 10815. <https://doi.org/10.3390/su172310815>
- Prieto, J.; González, C.; Román, A. & Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10: 29-44. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=939/93911243003>.
- Prieto-Méndez, J., Prieto-García, F., Acevedo-Sandoval, O., & Méndez-Marzo, M. (2013). Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del estado de Hidalgo, México. *agronomía mesoamericana*, 83.

- ProActivo, R. (2025). Perú impulsa la recuperación de suelos amazónicos contaminados por minería ilegal con tecnología propia. *Revista ProActivo*. <https://proactivo.com.pe/peru-impulsa-la-recuperacion-de-suelos-amazonicos-contaminados-por-mineria-ilegal-con-tecnologia-propia/>
- Pulido, M. (2014). Indicadores de calidad del suelo en áreas de pastoreo. Badajoz, España: Universidad de Extremadura.
- Quiroz, L. J. (2021). Efecto de biochar, micorrizas arbusculares y *Guazuma ulmifolia*, en la rehabilitación de suelos mineros. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/573/57366066033/html/>
- Ramos, C. J. G. (2022). Efecto del Biochar de Molle (*Schinus Molle* L.) en la recuperación de suelos degradados, usando como indicador el maíz (*Zea Mays* L.), Huánuco 2021. <http://repositorio.udh.edu.pe/handle/123456789/3408>
- Razzaghi, F., Obour, P. B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361, 114055. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055>
- Refertil, (2020). *¿Qué es el biocarbón y cómo se hace?* Aplicación en agricultura sostenible. <https://n9.cl/1zzx9>
- Rieuwerts, J. Thornton, I. Farago, M. & Ashmore, M. (1998). Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 10: 61-75. <https://doi.org/10.3184/095422998782775835>
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M. y Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. Roma, FAO. <https://n9.cl/t64la>
- Sauquillo, A., Rigol, A. and Rauret, G. (2003). Overview of the use of Leaching Extraction Tests for Risk Assessment of Trace Metals in Contaminated Soils and Sediments. *Trends in Analytical Chemistry*, 22: 152-159.

- Segovia, M. (2014). Bioaccesibilidad y biodisponibilidad de elementos traza en suelos contaminados y plantas. Tesis de Magister. Universidad de Chile, Santiago. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/138279>
- SERFOR (2025) *Servicios ecosistémicos forestales* <https://repositorio.serfor.gob.pe/bitstream/SERFOR/908/6/6-SERVICIOS%20ECOSISTEMICOS.pdf>
- Serrano, I. G. M. Y. (2019). Padrón Minero Nacional 2023: Actualizado al 31 de diciembre de 2022.
- Singh, A., Singh, M., & Prasad, S. (2025). Heavy metals contamination and their phytoremediation in soil and water for sustainable environmental restoration. *Environmental Pollution and Remediation*, 1–25. <https://link.springer.com/article/10.1007/s44274-025-00390-9>
- SQI. (1996) Indicators for soil quality evaluation. USDA, Natural Resources Conservation Service. Soil Quality Institute. Agricultural Research Service. USA.
- Suliman., W.; Harsh, J.; Abu-Lail, N.; Foruna, A.; Dallmeyer, I. & García-Perez, M. (2016). Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties. *Biomass and Bioenergy*, 84: 37-48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.010>
- Sun, W., Zhang, S. & Su, C. (2018). Impact of Biochar on the Bioremediation and Phytoremediation of Heavy Metal(loid)s in Soil. *Advances in Bioremediation and Phytoremediation*, 150-169. <https://www.intechopen.com/chapters/56622>
- Supo, J., & Zacarías, H. (2020). Metodología de la investigación científica. Sociedad Hispana de Investigadores Científicos.
- Tang, J.; Zhu, W.; Kookana, R. & Katayama, A. (2013). Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 116: 653-659. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2013.05.035>
- Tenesaca Martínez, S., Quevedo Guerrero, J. N., & García Batista, R. (2019). Determinación de la dosis óptima de biocarbón como enmienda edáfica

- en el cultivo de banano (*Musa X Paradisiaca L.*) Clon Williams. *Revista Científica Agroecosistemas*, 7(3), 134-141. Recuperado de <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>.
- Ticona, E. B. J. (2022). Eficiencia de diferentes dosis de biochar para remediar la acidificación del suelo agrícola, en invernadero, Puno, 2019. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC%20S.A.C./212>
- Torres-Sallan, Ortiz, Ubalde, Sort & Alcañiz, (2012). Aproximación ecotoxicológica a la contaminación por metales pesados en la laguna costera del Mar Menor. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. 190 pp.
- Vácha, R. (2021). Heavy metal pollution and its effects on agriculture. *Agronomy*, 11(9), 1719. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091719>
- Vallejo, V. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *SciELO*, 83-99.
- Vega, M. (2012). Los Alisos Milenarios de Shismay , *Alnus acuminata* H.B.K. Betulaceae. <http://shismay.blogspot.com/2012/10/los-alisos-milenarios-de-shismay-alnus.html?m=1>.
- Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., & Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, 184, 594-600. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.025>.
- Washington, V. A. J. (2020). *Cambios en las propiedades físicas, químicas, biológicas y captura de carbono del suelo en la recuperación de pasturas degradadas de braquiaria (Brachiaria decumbens), en Pucallpa, Perú*. <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/4617>
- Wilfredo, P. R. (2023). Remediación de suelos agrícolas contaminados con hidrocarburos aplicando el método landfarming en el sector trucha de oro, distrito de Catilluc, provincia de San Miguel - *Cajamarca*. https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/5635?utm_source.
- Yang, Y., Hassan, M. F., Ali, W., Zou, H., Liu, Z., & Ma, Y. (2025). Effects of Cadmium Pollution on Human Health: A Narrative Review. *Atmosphere*, 16(2), 225. <https://doi.org/10.3390/atmos16020225>

Zhang, X., Wang, H., He, L., Lu, K., Sarmah, A. K., Li, J., Bolan, N., Pei, J., & Huang, H. (2013). Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(12), 8472-8483. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1659-0>

COMO CITAR ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Chacon Soria, A. N. (2026). “*Comparación del efecto remediador de diferentes dosis de biochar de aliso (Alnus acuminata) sobre la calidad del suelo contaminado por metales pesados*” [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio institucional UDH. <http://...>

ANEXOS

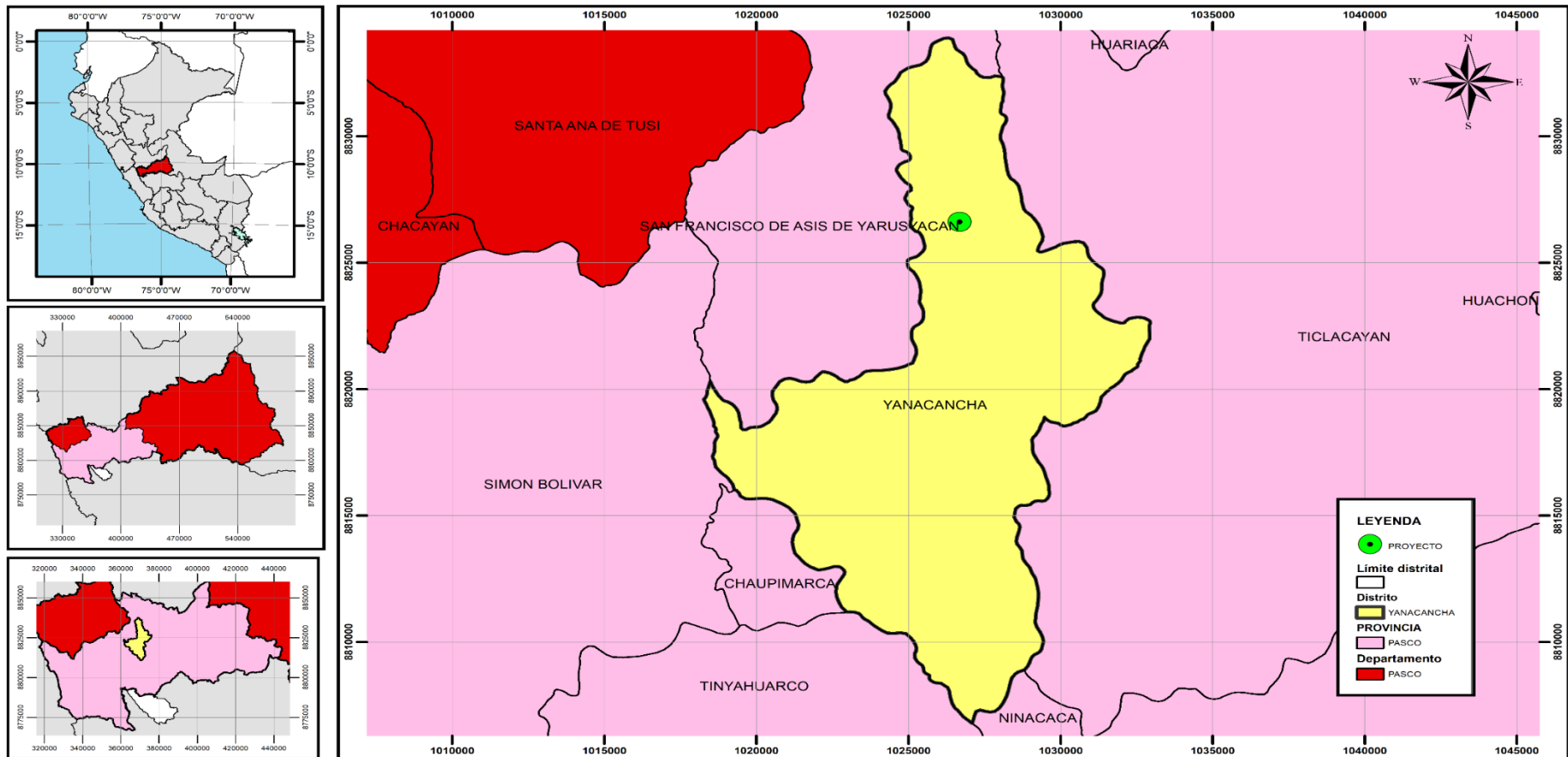
ANEXO 1

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Comparación del efecto remediador de diferentes dosis de biochar de aliso en la calidad del suelo contaminado por metales pesados.

Problema General	Objetivo General	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodología
<p>¿Cuál es el efecto remediador de diferentes dosis de biochar de aliso en la calidad del suelo contaminado por metales pesados?</p> <p>Problemas específicos</p> <p>¿Cuáles son las características de los parámetros físicos del suelo antes y después de la aplicación de las diferentes dosis de biochar?</p> <p>¿Cuáles son los valores de los indicadores químicos de fertilidad y nutrición del suelo antes y después de la aplicación de las diferentes dosis de biochar?</p> <p>¿Cuáles son los valores de los indicadores químicos de degradación del suelo antes y después de la aplicación de las diferentes dosis de biochar?</p> <p>¿Cuál es la concentración de metales pesados (cadmio y plomo) en el suelo antes y después de la aplicación de las diferentes dosis de biochar?</p>	<p>Comparar el efecto remediador de diferentes dosis de biochar de aliso en la calidad del suelo contaminado por metales pesados.</p> <p>Objetivos específicos</p> <p>Describir los parámetros físicos del suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.</p> <p>Determinar los indicadores químicos de fertilidad y nutrición en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.</p> <p>Analizar los indicadores químicos de degradación en el suelo contaminado por metales pesados antes y después de la remediación con diferentes dosis de biochar.</p> <p>Comparar la concentración final de metales pesados (cadmio y plomo) en el suelo entre los diferentes tratamientos para determinar la dosis más efectiva.</p>	<p>H1: Existe diferencia en el efecto remediador de dosis del biochar de aliso en la calidad del suelo contaminado por metales pesados.</p> <p>H0: No existe diferencia en el efecto remediador de dosis del biochar de aliso en la calidad del suelo contaminado por metales pesados.</p>	<p>Variable independiente: Remediación</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dosis de tratamiento al 15% - Dosis de tratamiento al 30% <p>Variable dependiente Calidad del suelo</p> <p>Físicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Arena - Arcilla - Limo <p>Químicos de Fertilidad y Nutrición:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Potencial de Hidrógeno (pH) - Materia Orgánica (M.O.) - Nitrógeno Total (N) - Fósforo (P) - Potasio disponible - Calcio (Ca) - Magnesio (Mg) - Potasio Intercambiable (K) <p>Químicos de Degradación:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Conductividad Eléctrica (CE) - Sodio Intercambiable (Na) <p>Contaminantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cadmio Total (Cd) - Plomo Total (Pb) 	<p>Tipo y Enfoque: Experimental, prospectivo, longitudinal y analítico con enfoque cuantitativo y nivel explicativo.</p> <p>Diseño: Experimento verdadero con Diseño Completamente al Azar (DCA), incluyendo un pre-test y cinco post-tests por grupo.</p> <p>Población: 100 m² de suelo agrícola contaminado en San Juan de Marambuco, Huánuco.</p> <p>Muestra: 30 m² de suelo seleccionados mediante muestreo no probabilístico por criterio.</p> <p>Grupos de Estudio: GE1 (Dosis de Biochar al 15%) y GE2 (Dosis de Biochar al 30%). evaluando la relación de causalidad entre la dosis y la calidad del suelo.</p>

ANEXO 2 MAPA DE UBICACIÓN



NOMBRE DEL PROYECTO:
"COMPARACIÓN DEL EFECTO REMEDIADOR DE DIFERENTES DOSIS DE BIOCHAR DE ALISO SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO CONTAMINADO POR METALES PESADOS"

UBICACIÓN
DISTRITO: Yanacancha
PROVINCIA: Pasco
REGIÓN: Pasco

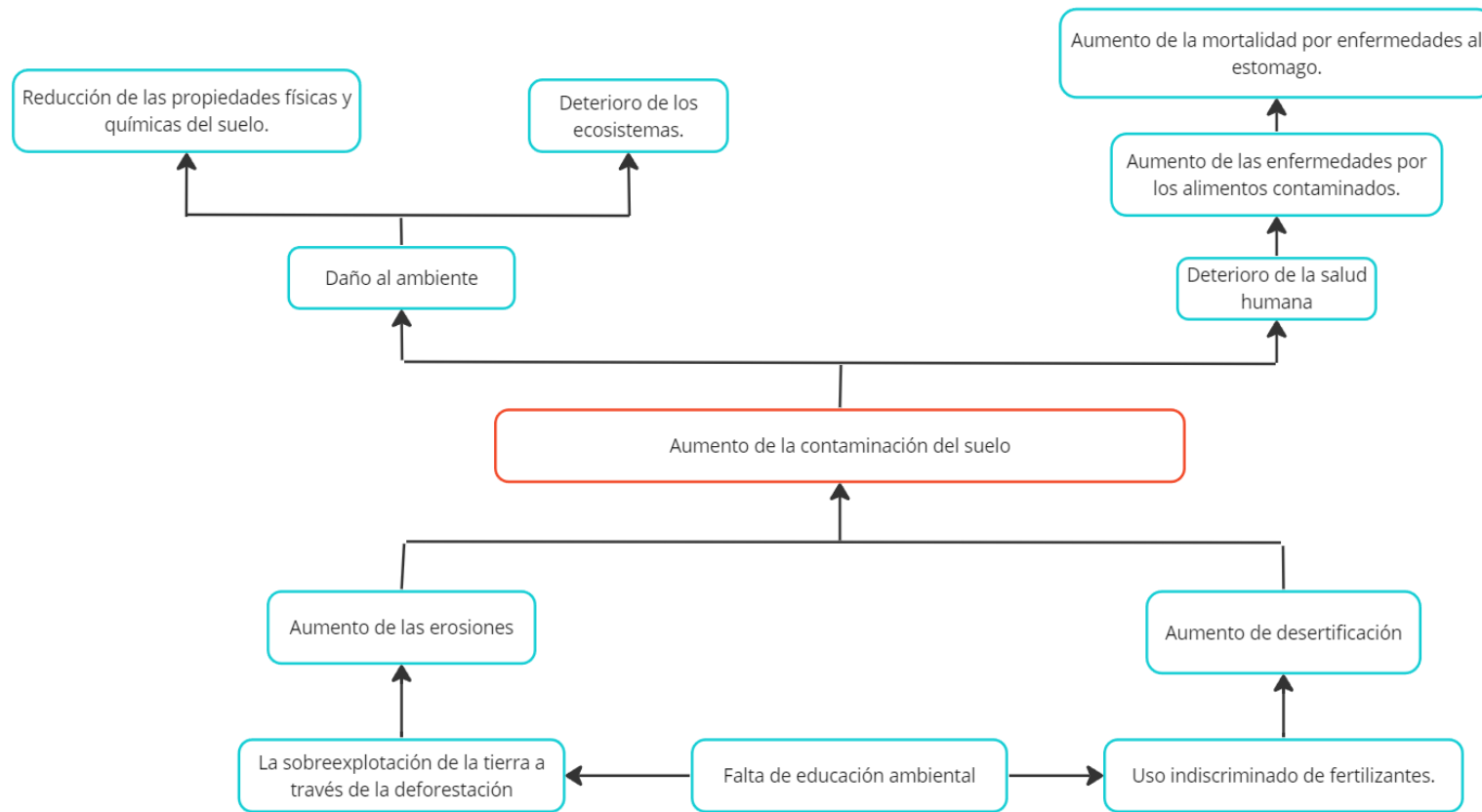
CADISTA
Chacón Soria Alalis Noreli

PLANO:
PLANO DE UBICACIÓN

SISTEMA DE COORDENADAS ESCALA
PROYECCIÓN: UTM 1/177 000
ZONA: 18 Sur FECHA:
COORDENADAS: UTM-84 12 - 06 - 2022

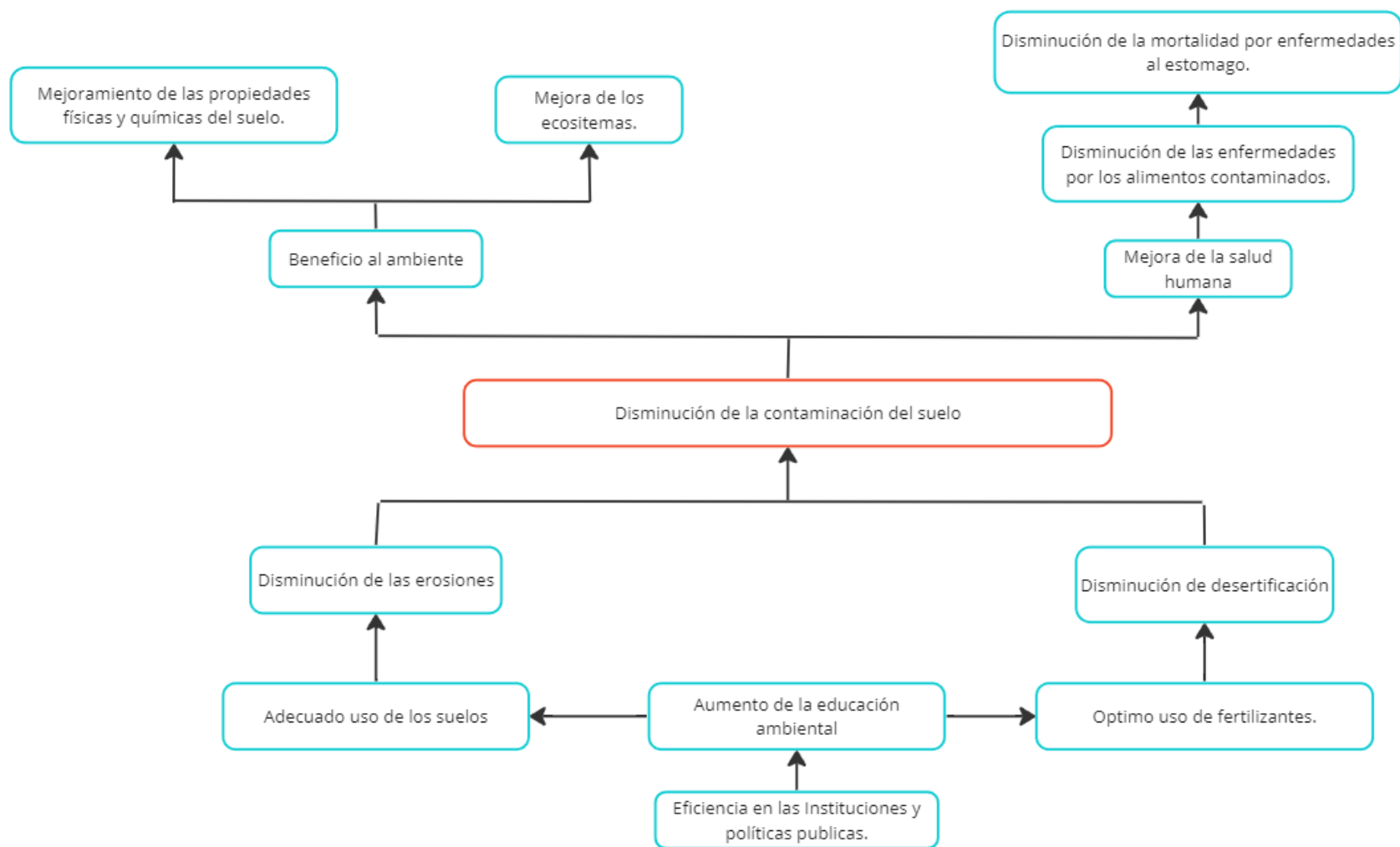
ANEXO 3

DIAGRAMA DE CAUSA – EFECTO



ANEXO 4

DIAGRAMA DE MEDIOS Y FINES



ANEXO 5

FICHAS DE REGISTRO

Datos generales:	
Fecha de Recolección de datos	
Nombre del sitio en estudio: C.P. S.J. Harambuco	Departamento: HUÁNUCO
Razón social: Trigo Marpa - UNAS	Provincia: HUÁNUCO
Uso principal: Muestreo de Suelo	Dirección del predio: Santa María del Valle
Datos del punto de muestreo: No probabilístico por criterio	
Nombre del punto de muestreo: C.P. de S.J. de Harambuco	Operador: (empresa/persona): Natural
Coordenadas: X: 9°53' 53.2" S 76° 8'52.31" W (UTM, WGS84) 374162.407 E / 890563.965 N	Descripción de la superficie: (pe, asfalto, cemento, vegetación)
Temperatura (°C) 21°/15°	Precipitación (si/no, intensidad):
Técnica de muestreo: De todo el cuarteto	Instrumentos usados: - Pico - Bolsas Hermeticas - Barreta - Tamizador - Pala - Balde
(p.e. sondeo manual/semi-mecánico/mecánico, zanja, etc.)	Napa freática: NI (si/no, profundidad en m)
Profundidad final: 0.30cm	Relleno del agujero después del muestreo: SI
(en metros bajo la superficie) 0.30cm	(si/no descripción): Se corrigió al nivel del suelo
Instalación de un pozo en el agujero: Ninguno	
(si/no descripción): Ninguno	

Fuente: MINAM 2014

Datos de las Muestras:							
SUELO + 15% DE BIOTCHAR							
Clave de la muestra:							
Fecha	24/02/2023						
Hora:	10:00 am - 12:30 am						
Profundidad desde:	30 cm x 30 cm						
(en metros bajo la superficie)	50 cm						
Profundidad hasta:	50 cm						
(en metros bajo la superficie)	—						
Características:	Ninguno						
Organolépticas	Ninguno						
Color:	Marrón Oscuro						
Olor:	Tierra Humeda						
Textura:	Alonso-Arcilla-LPm						
Compactación/Consistencia:							
Humedad:	90						
Componentes	Ninguno						
Antropogénicos:	Ninguno						
Estimación de la fracción > 2mm(%):							
Cantidad de la muestra:	1 kilo y medio						
(Volumen o peso)	1/2 kg.						
Medidas de conservación:	Ninguno						
Tipo de muestra:	Crápulo						
(simple/compuesta)	simple						
Para muestras superficiales compuestas							
Área de muestreo (m ²):	30 m ²						
Número de sub-muestras:	4						

Fuente: MINAM 2014

Datos de las Muestras:									
Suelo + 30% de Biochar									
Clave de la muestra:									
Fecha	24/02/2025								
Hora:	10:00 am - 11:50 am								
Profundidad desde:	30cm 30cm								
(en metros bajo la superficie)	50cm								
Profundidad hasta:	50cm								
(en metros bajo la superficie)									
Características:									
Organolépticas									
Color:	Harrón Oscuro								
Olor:	Tierra Humeda								
Textura:	Arena - Arcilla - Limo (franco)								
Compactación/Consistencia:	Hedra								
Humedad: %									
Componentes									
Antropogénicos:	Agricultura								
Estimación de la fracción > 2mm(%):	—								
Cantidad de la muestra:	Un Kfloy medio								
(Volumen o peso)	1/2 kg								
Medidas de conservación:	Bolsa Hermética								
Tipo de muestra:	Longitudinal								
(simple/compuesta)	Simple								
Para muestras superficiales compuestas									
Área de muestreo (m ²):	30 m ²								
Número de sub-muestras:	5								

Fuente: MINAM 2014

Datos de las Muestras:				
Biodhar de Alto 30% / 15%				
Clave de la muestra:	E25	00	29	
Fecha	12	02	2024	
Hora:	08:00	am		
Profundidad desde:	-	-	-	
(en metros bajo la superficie)	-	-	-	
Profundidad hasta:	-	-	-	
(en metros bajo la superficie)	-	-	-	
Características:				
Organolépticas				
Color:	M1	M1	M1	Negro Oscuro
Olor:	M1	M1	M1	Plomo Cenizo
Textura:	94	80	0%	Plastera Seca
Compactación/Consistencia:	-	-	-	
Humedad:	5.2	00%		Hd
Componentes	-	-	-	
Antropogénicos:	ninguno			
Estimación de la fracción > 2mm(%):	-	-	-	
Cantidad de la muestra:	20	kg		
(Volumen o peso)	20	KPlas		
Medidas de conservación:	10	kg	10	kg
Tipo de muestra:	-	-	-	Cajas de cartón
(simple/compuesta)	-	-	-	Gas: Humeda
	-	-	-	Simple
Para muestras superficiales compuestas				
Área de muestreo (m2):				
Número de sub-muestras:	15%	30%		5 ud/pm

Fuente: MINAM 2014

ANEXO 6

RESULTADOS DE LABORATORIO

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	CHACON SORIA ALALIS	FECHA DE REPORTE:	4/3/2025
PROCEDENCIA:	HUANUCO	RECIBO N°:	68496
REFERENCIA:	TIPO DE MUESTRA: SUELO	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS FÍSICO											ANÁLISIS QUÍMICO													
			Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	CE	pH	Materia Orgánica	N	C	P	K ₂ O	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio	Cadmio Total	Ploomo Total	
			Ao	Arc	Lo		dS/m	M.O.	total	Orgánico	disponible	Calcio	Magnesio		Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrógeno	%	%		%	mg/Kg	mg/Kg			
			CODIGO DEL LABORATORIO	REFERENCIA DEL SOLICITANTE	%	%	%	1:1	1:1	%	%	%	ppm	ppm	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						%	%	%	mg/Kg	mg/Kg		
1	S25-0082	M1	39	21	40	Franco	0.22	4.76	1.08	0.054	0.626	5.304	95.205	---	4.780	0.613	0.315	0.161	0.875	0.465	7.210	81.415	18.585	12.136	1.530	78.380	

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.
 Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología





ANALISIS ESPECIAL



1. DATOS

SOLICITANTE:	CHACON SORIA ALALIS	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE
DEPARTAMENTO:	HUANUCO	FECHA DE REPORTE:	4/3/2025
MUESTRA:	BIOCHAR	RECIBO O FACTURA:	68496

2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

DATOS DE LA MUESTRA		RESULTADOS EN BASE HUMEDA					
Código	Dato	PH	CE (dS/m)	Humedad Hd (%)	Materia Seca (%)	Materia Organica (%)	Cenizas (%)
E25-0029	M1	8.10	2.38	5.200	94.800	79.200	15.600

Los Resultados presentados son válidos unicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.

Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

Hugo Alarido
Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología





ANALISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	CHACON SORIA ALALIS NORELI	FECHA DE REPORTE:	12/5/2025
PROCEDENCIA:	CENTRO POBLADO SAN JUAN DE MARAMBUCO - HUANUCO	RECIBO N°	15346715
REFERENCIA:	SUELO	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANALISIS FISICO					ANALISIS QUIMICO															
			Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	CE	pH	Materia Orgánica	N	P	K ₂ O	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio
			Áo	Árc	Lo		dS/m	M.O.	total	disponible	disponible	Calcio		Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrógeno	%		%	%	
			CODIGO DEL LABORATORIO	REF	%		%	%	1:1	1:1	%	%		ppm	ppm	CAMBIABLES					Cmol(+)/kg	%	%
1	S24-0326-1	B 15%	43	21	36	Franco	0.88	6.68	1.25	0.063	9.328	118.452	9.025	7.890	0.849	0.197	0.089	0.000	0.000	---	100.000	0.000	0.000
2	S24-0326-2	B 30%	45	23	32	Franco	0.71	6.65	1.34	0.067	10.219	121.808	10.104	8.790	0.952	0.264	0.098	0.000	0.000	---	100.000	0.000	0.000

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.
 Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología





ANALISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	CHACON SORIA ALALIS NORELI	FECHA DE REPORTE:	26/05/2025
PROCEDENCIA:	CENTRO POBLADO SAN JUAN DE MARAMBUCO - HUANUCO	RECIBO N°:	75806
REFERENCIA:	SUELO	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANALISIS FISICO					ANALISIS QUIMICO																	
			Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	CE	pH	Materia Orgánica	N	P	K ₂ O	Cd	Pb	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio
			Ao	Arc	Lo		dSm	M.O.	total	disponible	disponible	total	total	Calcio		Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrógeno	%		%	%	
			%	%	%		1:1	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		ppm	ppm	ppm
CODIGO DEL LABORATORIO	REF													CAMBIABLES			Cmol(+)/kg								
1	S25-477-1	B 15%	51	19	30	Franco	0.88	6.67	1.24	0.06	9.30	118.20	0.702	15.845	9.01	7.88	0.843	0.193	0.089	0	0	---	100	0	0
2	S25-477-2	B 30%	47	21	32	Franco	0.71	6.65	1.33	0.07	10.19	122.12	0.499	11.847	10.02	8.71	0.948	0.261	0.096	0	0	---	100	0	0

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.
 Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Tingo María

[Handwritten Signature]

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
 Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología





ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	CHACON SORIA ALALIS NORELI	FECHA DE REPORTE:	25/06/2025
PROCEDENCIA:	CENTRO POBLADO SAN JUAN DE MARAMBUCO - HUANUCO	RECIBO N°:	76894
REFERENCIA:	SUELO	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS FÍSICO				ANÁLISIS QUÍMICO																	
			Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	CE	pH	Materia Orgánica	N	P	K ₂ O	Cd	Pb	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidez Cambiable
			Ao	Arc	Lo		dSm	M.O.	total	disponible	disponible	total	total	Calcio		Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrogeno	%		%	
			CODIGO DEL LABORATORIO	REF	%		%	%	1:1	1:1	%	%	ppm	ppm		ppm	ppm	CAMBIABLES Cmol(+)kg						%
1	S25-656-1	B 15%	50	21	29	Franco	0.880	6.67	1.25	0.06	9.300	118.20	0.687	14.598	9.005	7.880	0.843	0.193	0.089	0	0	---	100	0
2	S25-656-2	B 30%	48	21	31	Franco	0.710	6.65	1.32	0.07	10.190	122.12	0.482	10.958	10.015	8.710	0.948	0.261	0.096	0	0	---	100	0

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.
Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología





ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	CHACON SORIA ALALIS NORELI	FECHA DE REPORTE:	11/07/2025
PROCEDENCIA:	CENTRO POBLADO SAN JUAN DE MARAMBUCO - HUANUCO	RECIBO N°:	7295608
REFERENCIA:	SUELO	MUESTREO POR:	EL SOLICITANTE

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS FÍSICO					ANÁLISIS QUÍMICO																	
			Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	CE	pH	Materia Orgánica	N	P	K ₂ O	Cd	Pb	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidez Cambiable	Saturación de Aluminio
			Ao	Arc	Lo		dSm		M.O.	total	disponible	disponible	total	total		Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrógeno		%	%	%
			CODIGO DEL LABORATORIO	REF	%		%		%	1:1	1:1	%	%	ppm		ppm	ppm	ppm	CAMBIABLES Cmol(+)/kg					%	%
1	S25-842-1	B 15%	51	19	30	Franco	0.86	6.65	1.24	0.06	9.27	117.27	0.52	13.16	8.96	7.85	0.831	0.19	0.088	0	0	---	100	0	0
2	S25-842-2	B 30%	47	21	32	Franco	0.72	6.64	1.31	0.07	10.12	123.59	0.36	9.19	9.99	8.69	0.947	0.26	0.091	0	0	---	100	0	0

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.
 Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Tingo María

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
 Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología





ANÁLISIS DE SUELOS



SOLICITANTE:	CHACON SORIA ALALIS NORELI	FECHA DE REPORTE:	30/07/2025
PROCEDENCIA:	CENTRO POBLADO SAN JUAN DE MARAMBUCO - HUANUCO	RECIBO N°:	78533
REFERENCIA:	SUELO	MUESTREO POR:	EL SOLICITANTE

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANÁLISIS FÍSICO				ANÁLISIS QUÍMICO																	
			Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	CE	pH	Materia Orgánica	N	P	K ₂ O	Cd	Pb	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CICe	Bases Cambiables	Acidez Cambiable
			Ao	Arc	Lo		dSm		M.O.	total	disponible	disponible	total	total		Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	Aluminio	Hidrogeno		%	%
			CODIGO DEL LABORATORIO	REF	%	%	%	1:1	1:1	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						%	%	
1	S25-891-1	B 15%	49	21	30	Franco	0.892	6.64	1.26	0.06	9.300	118.20	0.473	12.378	9.055	7.920	0.845	0.199	0.091	0	0	---	100	0
2	S25-891-2	B 30%	50	21	29	Franco	0.731	6.69	1.34	0.07	10.190	122.12	0.315	8.457	10.082	8.730	0.988	0.267	0.097	0	0	---	100	0

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.
 Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Tingo María

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
 Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



ANEXO 7

DECRETO SUPREMO N° 011-2017-MINAM (2017) – ECA, PARA SUELO.

14

NORMAS LEGALES

Sábado 2 de diciembre de 2017 /  **El Peruano**

ANEXO
ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA SUELO

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

Notas:

[**] Este símbolo dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para el uso de suelo agrícola.

(1) **Suelo:** Material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad.

(2) **PS:** Peso seco.

(3) **Suelo agrícola:** Suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas.

(4) **Suelo residencial/parques:** Suelo ocupado por la población para construir sus viviendas, incluyendo áreas verdes y espacios destinados a actividades de recreación y de esparcimiento.

(5) **Suelo comercial:** Suelo en el cual la actividad principal que se desarrolla está relacionada con operaciones comerciales y de servicios.

(6) **Suelo industrial/extractivo:** Suelo en el cual la actividad principal que se desarrolla abarca la extracción y/o aprovechamiento de recursos naturales (actividades mineras, hidrocarburos, entre otros) y/o, la elaboración, transformación o construcción de bienes.

(7) **Métodos de ensayo estandarizados vigentes o métodos validados** que cuenten con la acreditación nacional e internacional correspondiente, en el marco del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo de la International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC). Los métodos de ensayo deben contar con límites de cuantificación que estén por debajo del ECA

ANEXO 8

PANEL FOTOGRÁFICO

Excavación y medición de la calicata para la toma de muestra de suelo.



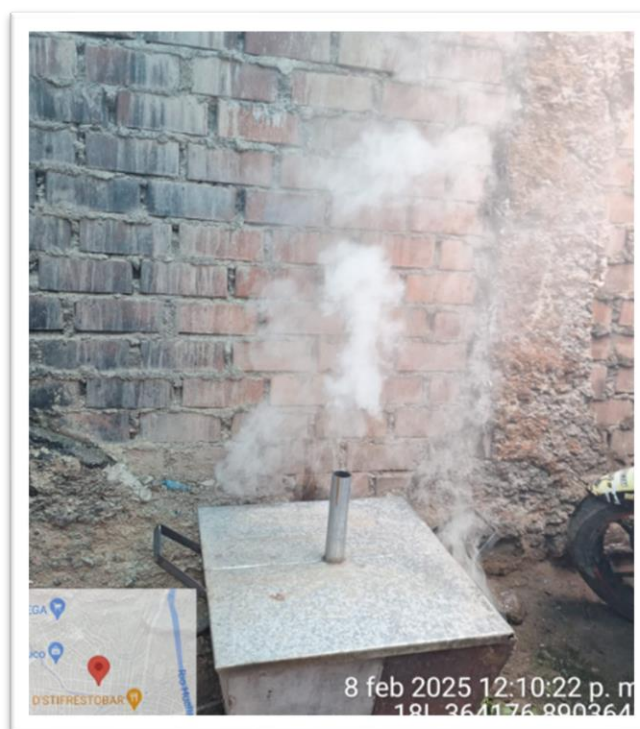
División y uniformización de las muestras utilizando el método de cuarteo.



Carga del cilindro interno del horno pirolítico con ramas de aliso para la producción de biochar.



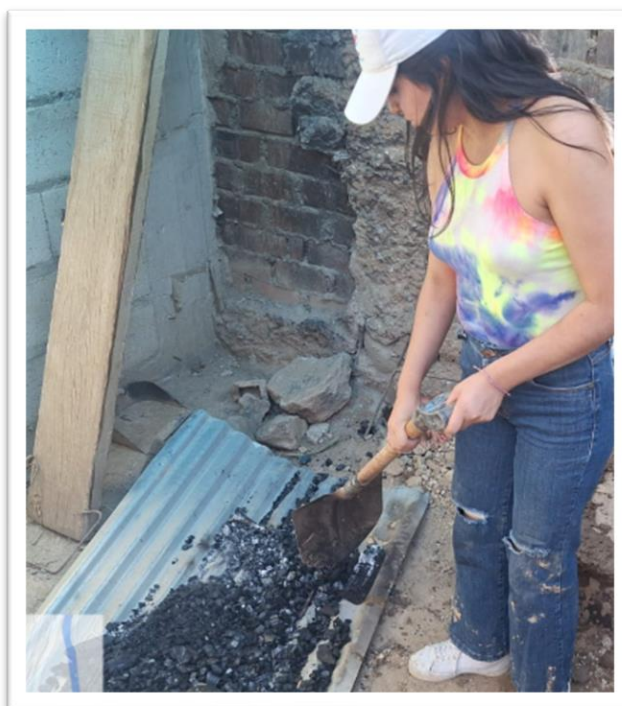
Horno pirolítico en funcionamiento inicial



Control de la temperatura del horno durante el proceso de pirólisis en condiciones sin presencia de oxígeno.



Producto final de biochar obtenido del aliso en un horno pirolítico.



Inspección del proyecto de investigación por el jurado revisor.



Mezcla del biochar de aliso con el suelo contaminado en proporciones del 15% y 30% de biochar para su posterior análisis de suelo.



Secado de las muestras en el laboratorio para su análisis posterior al tratamiento con biochar de aliso en concentraciones del 15% y 30%.



Visita final del jurado revisor, durante la cual se efectuó el muestreo final del suelo tratado con biochar en proporciones del 15% y 30%.

