

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y  
RECURSOS NATURALES**



**Tesis**

Fitorremediación con el cultivo de girasol (*Helianthus annuus L.*) en suelos contaminados mediante la remoción de cadmio y plomo en el relleno sanitario del distrito de Andahuaylas – Apurímac, 2024.

**Asesor:**

Mg. Rodas Ccopa, Herbert

**Autor:**

Carire Huaylla, Jhanio

**Para optar el Título Profesional:**

Ingeniero Ambiental

Andahuaylas - Apurímac – Perú

2025

## Acta de Sustentación



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
ESCUELA PROFESIONAL DE ING. AMBIENTAL Y RR. NN

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 011

En la ciudad de Andahuaylas, a los 18 días del mes de noviembre del 2025, siendo las 10:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Sub Directoral N° 065-2025-UTEA-FI-EPIARN/SD de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, Facultad de Ingeniería.

|               |                                       |
|---------------|---------------------------------------|
| Presidente:   | Mg. Fuentes Alliccahuaman, María      |
| Dictaminante: | Ing. Barazorda Carrillo, José Gabriel |
| Replicante:   | Mg. Rojas Cacéres, Mariela            |

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

**Fitorremediación con el cultivo de Girasol (*Helianthus annuus*;L) en suelos contaminados mediante la remoción de cadmio y plomo en el relleno sanitario del distrito de Andahuaylas – Apurímac, 2024.**

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: Carire Huaylla, Jhanio  
(Apellidos y Nombres)

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Ambiental  
(Denominación del Título)

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) **APROBADO (S)**:

Por: Unanimidad  
(Unanimidad o Mayoría) (\*)

Emitiéndose el calificativo final de:

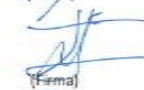
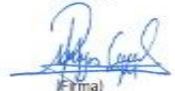
| Bachilleres (Apellidos y Nombres) | Calificación (**) |
|-----------------------------------|-------------------|
| Br. Carire Huaylla, Jhanio        | Aprobado          |

Siendo las 12:30 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mg. Fuentes Alliccahuaman, María

Dictaminante: Ing. Barazorda Carrillo, José Gabriel

Replicante: Mg. Rojas Cacéres, Mariela

  
(Firma)  
  
(Firma)  
  
(Firma)

(\*) Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Art. 18 RGGAT.  
(\*\*): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

# Reporte de Similitud



Página 2 de 132 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::3



## 20% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

### Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
- 6%  Publicaciones
- 16%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Página 2 de 132 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::3117:594477332

## Metadatos

| Datos del Autor                                  |   |                                                                                                     |
|--------------------------------------------------|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Apellidos y nombres                              | : | Carire Huaylla Jhanio                                                                               |
| Tipo de Documento de Identidad                   | : | DNI                                                                                                 |
| Número de Documento de Identidad                 | : | 48075149                                                                                            |
| URL ORCID                                        | : | <a href="https://orcid.org/0009-0009-8036-2266">https://orcid.org/0009-0009-8036-2266</a>           |
| Datos del Asesor                                 |   |                                                                                                     |
| Apellidos y nombres                              | : | Mg. Rodas Ccopa Herbert                                                                             |
| Tipo de Documento de Identidad                   | : | DNI                                                                                                 |
| Número de Documento de Identidad                 | : | 40851862                                                                                            |
| URL ORCID                                        | : | <a href="https://orcid.org/0000-0001-9646-2573">https://orcid.org/0000-0001-9646-2573</a>           |
| Datos de la investigación                        |   |                                                                                                     |
| Facultad                                         | : | Ingeniería                                                                                          |
| Escuela Profesional                              | : | Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales                                                           |
| Línea de Investigación                           | : | Calidad Ambiental                                                                                   |
| Rango de años en que se realizó la investigación | : | 2023-2024                                                                                           |
| Fuente de financiamiento                         | : | Autofinanciada                                                                                      |
| Porcentaje de similitud                          | : | 20% con depósito                                                                                    |
| URL de OCDE                                      | : | <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01</a> |

### **Dedicatoria**

Con mucho amor, dedico este trabajo a mis padres, Isabel Huaylla Baltazar y Daniel Carire Condor, así como a mis hermanos Bruner, Flor de Luz y Yakelin Carire Huaylla, por su constante apoyo moral, familiar e incondicional durante este proceso académico.

## **Agradecimiento**

A Dios, por otorgarme la sabiduría, la constancia y el ánimo necesarios para concluir esta etapa académica.

Al Ing. Herbert Rodas Ccopa, por su orientación oportuna, exigencia académica y acompañamiento durante el desarrollo de este estudio.

A la Universidad Tecnológica de los Andes, por la formación académica brindada, el valioso apoyo de su Laboratorio de Química y Farmacología, y la asistencia técnica de sus docentes, cuyo compromiso contribuyó significativamente a la realización de este trabajo.

## Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar la remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en suelos contaminados del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas. Se empleó un enfoque cuantitativo, con diseño experimental y nivel explicativo. Se muestrearon 45 puntos distribuidos dentro y alrededor del relleno sanitario, extrayéndose aproximadamente 2 kg de suelo por punto, obteniéndose 90 kg de suelo contaminado para el experimento. Las muestras fueron homogenizadas y sometidas a cuarteo, obteniéndose 1 kg representativo para el análisis inicial de metales pesados, con concentraciones de Cd: 2,4 ppm y Pb: 21 ppm. La determinación se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica, siguiendo protocolos establecidos para suelos contaminados. Los 89 kg restantes se dividieron en dos tratamientos: T1 (44.5 kg de suelo con 9 kg de compost casero) y T2 (44.5 kg de suelo sin compost). Cada tratamiento se distribuyó en tres macetas con tres plantas de girasol por maceta. Ambos tratamientos fueron cubiertos con mulch agrícola y evaluados a los 30, 60 y 120 días, considerando variables morfológicas y concentración de metales pesados en el suelo. A los 120 días, T1 alcanzó una reducción de Cd del 54.17 % y de Pb del 42.86 %, mientras que T2 logró 45.83 % y 33.33 %. La prueba t de Student mostró diferencia significativa para Cd ( $p = 0,045$ ), pero no para Pb ( $p = 0,719$ ). El girasol demostró capacidad para remover Cd y Pb, logrando mayor reducción con compost casero y evidenciando eficiencia en la remoción del suelo contaminado.

**Palabras clave:** *Helianthus annuus* L., fitorremediación, cadmio, plomo, suelos contaminados.

## **Abstract**

The objective of this study was to evaluate the removal of cadmium (Cd) and lead (Pb) in contaminated soils from the sanitary landfill of the district of Andahuaylas. A quantitative approach with an experimental and explanatory design was applied. Forty-five sampling points were distributed within and around the landfill area, collecting approximately 2 kg of soil per point, obtaining a total of 90 kg of contaminated soil for the experiment. The samples were homogenized and subjected to quartering, obtaining 1 kg for the initial heavy metal analysis, which reported concentrations of Cd: 2.4 ppm and Pb: 21 ppm. Determination was carried out by atomic absorption spectrophotometry following established protocols for contaminated soils. The remaining 89 kg were divided into two treatments: T1 (44.5 kg of soil mixed with 9 kg of homemade compost) and T2 (44.5 kg of soil without compost). Each treatment was distributed in three pots with three sunflower plants per pot. Both treatments were covered with agricultural mulch and evaluated at 30, 60, and 120 days, considering morphological variables and heavy metal concentration in the soil. At 120 days, T1 reached a Cd reduction of 54.17% and Pb reduction of 42.86%, while T2 achieved 45.83% and 33.33%, respectively. Student's t-test showed a significant difference for Cd ( $p = 0.045$ ), but not for Pb ( $p = 0.719$ ). Sunflower demonstrated the capacity to remove Cd and Pb, achieving greater reduction with homemade compost.

**Keywords:** *Helianthus annuus* L., phytoremediation, cadmium, lead, contaminated soils.



## Índice

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| Portada.....                                      | i         |
| Acta de sustentación .....                        | ii        |
| Reporte de similitud .....                        | iii       |
| Metadatos.....                                    | iv        |
| Dedicatoria .....                                 | v         |
| Agradecimiento.....                               | vi        |
| Resumen .....                                     | vii       |
| Abstract .....                                    | viii      |
| Índice general .....                              | ix        |
| Índice de tablas .....                            | xi        |
| Índice de figuras .....                           | xii       |
| Índice de Anexos .....                            | xiii      |
| <b>I. Introducción.....</b>                       | <b>14</b> |
| <b>II. Planteamiento del problema.....</b>        | <b>15</b> |
| 2.1. Descripción y formulación del problema ..... | 15        |
| 2.2. Objetivos.....                               | 17        |
| 2.2.1 Objetivo general.....                       | 17        |
| 2.2.2 Objetivos específicos .....                 | 17        |
| 2.3. Justificación e importancia.....             | 17        |
| 2.4. Hipótesis.....                               | 18        |
| 2.5. Variables.....                               | 19        |
| <b>III. Marco teórico .....</b>                   | <b>21</b> |
| 3.1. Antecedentes.....                            | 21        |
| 3.2. Bases teóricas .....                         | 25        |
| 3.3. Definición de términos .....                 | 36        |

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| <b>IV. Metodología</b> .....             | 37 |
| 4.1. Tipo y nivel de Investigación.....  | 37 |
| 4.2. Ámbito temporal y espacial .....    | 38 |
| 4.3. Población, muestra y muestreo ..... | 40 |
| 4.4. Instrumentos.....                   | 43 |
| 4.5. Procedimientos.....                 | 43 |
| 4.6. Análisis de datos .....             | 55 |
| 4.7. Consideraciones Éticas .....        | 56 |
| <b>V. Resultados y discusión</b> .....   | 57 |
| <b>V.I. Conclusiones</b> .....           | 76 |
| <b>VII. Recomendaciones</b> .....        | 77 |

## Índice de tablas

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1</b> Operacionalización de variables .....                                                  | 20 |
| <b>Tabla 2</b> Clase textural del suelo experimental .....                                            | 31 |
| <b>Tabla 3</b> Composición y distribución de los tratamientos 1 y 2 en el diseño experimental         | 38 |
| <b>Tabla 4</b> Coordenadas UTM del relleno sanitario.....                                             | 39 |
| <b>Tabla 5</b> Ubicación geográfica y cantidad de muestra por punto de muestreo .....                 | 41 |
| <b>Tabla 6</b> Cronograma de riego según la etapa fenológica del girasol.....                         | 50 |
| <b>Tabla 7</b> Composición de residuos orgánicos utilizados en la elaboración del compost ....        | 57 |
| <b>Tabla 8</b> Resultados de humedad (cascara de frutas) .....                                        | 58 |
| <b>Tabla 9</b> Contenido de agua (para restos de verduras frescas y cascara de huevo) .....           | 59 |
| <b>Tabla 10</b> Composición de residuos antes del compostaje .....                                    | 59 |
| <b>Tabla 11</b> Concentración inicial cadmio y plomo.....                                             | 61 |
| <b>Tabla 12</b> Evaluación morfológica del girasol ( <i>Helianthus annuus</i> L.) (día 30) .....      | 62 |
| <b>Tabla 13</b> Concentración removida de cadmio (Cd) y plomo (Pb) a los 30 días .....                | 63 |
| <b>Tabla 14</b> Evaluación morfológica del girasol ( <i>Helianthus annuus</i> L.) a los 60 días ..... | 64 |
| <b>Tabla 15</b> Concentración removida de cadmio (Cd) y plomo (Pb) a los 60 días .....                | 65 |
| <b>Tabla 16</b> Evaluación morfológica del girasol ( <i>Helianthus annuus</i> L.) a los 120 .....     | 67 |
| <b>Tabla 17</b> Concentración removida de cadmio (Cd) y plomo (Pb) a los 120 días .....               | 67 |
| <b>Tabla 18</b> Prueba de normalidad para la eficiencia de remoción del cadmio.....                   | 69 |
| <b>Tabla 19</b> Prueba t para comparación de medias en la eficiencia de remoción de cadmio.<br>.....  | 70 |
| <b>Tabla 20</b> Prueba de normalidad para la eficiencia de remoción del plomo .....                   | 72 |
| <b>Tabla 21</b> Prueba t para comparación de medias en la eficiencia de remoción de plomo.            | 73 |

## Índice de figuras

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> Ingreso radicular y detoxificación intracelular de metales pesados.....                                       | 28 |
| <b>Figura 2</b> Translocación y acumulación de metales pesados en tejidos vegetales.....                                      | 29 |
| <b>Figura 3</b> Mapa de ubicación del relleno sanitario de Andahuaylas .....                                                  | 39 |
| <b>Figura 4</b> Ubicación de los puntos de muestreo .....                                                                     | 42 |
| <b>Figura 5</b> Aplicación de la técnica del cuarteo para la obtención de una muestra<br>representativa de 1 kg de suelo..... | 44 |
| <b>Figura 6</b> Delimitación e instalación del campo experimental .....                                                       | 45 |
| <b>Figura 7</b> Ubicación de los tratamientos aplicados en el área experimental.....                                          | 51 |

## Índice de Anexos

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Anexo 1</b> Matriz de consistencia .....                                                  | 93  |
| <b>Anexo 2</b> Plano de Ubicación Relleno Sanitario .....                                    | 94  |
| <b>Anexo 3</b> Toma de muestra Relleno Sanitario de Andahuaylas.....                         | 95  |
| <b>Anexo 4</b> Foco de contaminación relleno sanitario .....                                 | 96  |
| <b>Anexo 5</b> Muestra extraída de los 45 puntos del relleno sanitario.....                  | 96  |
| <b>Anexo 6</b> Preparado de sustrato experimental según tratamiento .....                    | 97  |
| <b>Anexo 7</b> Girasol ( <i>Helianthus annuus</i> , L).....                                  | 97  |
| <b>Anexo 8</b> Instalación de los tratamientos 1 y 2 con tres repeticiones.....              | 98  |
| <b>Anexo 9</b> Proceso de germinación de las semillas de Girasol después de los 10 días..... | 99  |
| <b>Anexo 10</b> Extracción de muestra en la Fase vegetativa inicial a los 30 días .....      | 100 |
| <b>Anexo 11</b> Extracción de muestra en la Fase vegetativa Avanzada a los 60 días....       | 101 |
| <b>Anexo 12</b> Extracción de muestra en la Fase vegetativa senescencia a los 120 días.....  | 102 |
| <b>Anexo 13</b> Medición fenológica del Girasol .....                                        | 102 |
| <b>Anexo 14</b> Pesado de sustrato experimental.....                                         | 103 |
| <b>Anexo 15</b> Equipo para análisis de los metales pesados Cadmio (Cd) y Plomo (Pb).....    | 103 |
| <b>Anexo 16</b> Puntos de Muestreo según Coordenadas .....                                   | 104 |
| <b>Anexo 17</b> Ficha de registro.....                                                       | 108 |
| <b>Anexo 18</b> Informe de laboratorio.....                                                  | 109 |

## I. Introducción

El suelo es un recurso natural esencial que sostiene la producción mundial de alimentos y participa en procesos vitales como el ciclo de nutrientes y el crecimiento vegetal (FAO, 2021; USDA NRCS, 2024). No obstante, su equilibrio se ve afectado por la acumulación de metales pesados como el cadmio (Cd) y el plomo (Pb), cuya toxicidad y persistencia generan un problema ambiental al disminuir la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos. Estudios recientes reportan su presencia creciente en suelos agrícolas y de disposición de residuos, lo que evidencia la relevancia y vigencia del problema (Prodipto et al., 2024; Criado, 2025).

El cadmio puede provocar alteraciones metabólicas en las plantas y reducir el rendimiento agrícola; mientras que el plomo afecta la actividad microbiana del suelo (Hughes, 2024). En países como India, China y Perú, se ha demostrado que estos contaminantes existen en los rellenos sanitarios.

En este contexto, la fitorremediación se presenta como una opción con un coste reducido y respetuosa con el medio ambiente para restaurar los terrenos contaminados. Esta investigación evalúa el uso de *Helianthus annuus* L. (girasol), una especie reconocida por su acelerado crecimiento, elevada producción de biomasa y remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) (Alaboudi et al., 2018; Sewelam, 2014).

El contenido del trabajo actual se estructura de esta forma: el Capítulo I expone el plan de investigación, incluyendo la delimitación del problema, formulación, objetivos y justificación. El Capítulo II aborda el marco teórico, destacando antecedentes relevantes y fundamentos científicos relacionados con la fitorremediación y el uso del girasol. El Capítulo III detalla la metodología empleada, el tipo y diseño del estudio, las variables, hipótesis y técnicas de análisis. Finalmente, el Capítulo IV presenta y discute los resultados, seguidos de las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

## II. Planteamiento del problema

### 2.1. Descripción y formulación del problema

La acumulación de metales pesados como el cadmio (Cd) y el plomo (Pb) en suelos de rellenos sanitarios es un problema ambiental y sanitario significativo, por su persistencia, toxicidad y capacidad. Para alterar el equilibrio ecológico. Estos metales provienen principalmente de residuos inorgánicos como baterías, aparatos electrónicos, fertilizantes y plásticos, y son liberados al suelo mediante procesos de lixiviación, generando contaminación crónica.

En el Perú, los rellenos sanitarios son instalaciones clave para la disposición final de desechos sólidos; sin embargo, su limitada cobertura y deficiencias en el manejo de lixiviados pueden generar contaminación del suelo. Esta situación también se evidencia en otros países, donde se han reportado incrementos de metales pesados en zonas cercanas a estos sitios. En Túnez se registraron concentraciones de Pb entre 5,6 y 16,1 mg/kg en suelos próximos a una balsa de lixiviados sin revestimiento (Bouzayani et al., 2014), mientras que en el Tíbet se reportaron 36,4 mg/kg de Pb y 0,39 mg/kg de Cd en suelos adyacentes a un relleno sanitario, superando los valores naturales (Zho et al., 2022).

En el relleno sanitario, los metales pesados como cadmio (Cd) y plomo (Pb) provienen principalmente de la descomposición y lixiviación de residuos urbanos tales como baterías, pilas, cables eléctricos, pinturas, productos electrónicos, plásticos y lodos industriales o domésticos. Cuando estos residuos se depositan sin separación adecuada, los lixiviados transportan estos metales hacia el suelo, facilitando su acumulación en la matriz edáfica. En el Perú, un estudio realizado en Cajamarca evidenció que los suelos en contacto con lixiviados de rellenos sanitarios presentan una retención progresiva de Cd y Pb (Zelada et al., 2023). El Cd, por su alta movilidad, puede ser absorbido rápidamente por las plantas, mientras que el Pb, aunque menos móvil, tiende a concentrarse en las capas superficiales del suelo, afectando organismos incluso a bajas concentraciones (Alloway, 2013; Kabata & Pendias, 2011).

En Andahuaylas, el relleno sanitario viene operado desde el año 2018 y se encuentra próximo a finalizar su vida útil de 10 años, según la normativa peruana. Su eventual reconversión en parque o área verde exige garantizar un suelo limpio y seguro. Por ello, se plantea la necesidad de remediar el sitio antes de su reaprovechamiento.

En este contexto, se incorporó compost casero como enmienda orgánica para evaluar su influencia en la movilidad y biodisponibilidad del Cd y Pb en el suelo, ya que su contenido de materia orgánica puede adsorber o movilizar metales, mejorar la estructura del sustrato y modificar las condiciones de disponibilidad para las raíces. Esto permite contrastar la eficiencia de fitoextracción del girasol en sustratos con y sin compost, aportando mayor valor al diseño experimental.

La fitorremediación constituye una alternativa eficiente y sostenible para recuperar suelos contaminados. En este estudio se seleccionó *Helianthus annuus L.* (girasol) a causa de su rápido desarrollo, producción elevada de biomasa y sistema radicular profundo, características que favorecen la absorción y acumulación de Cd y Pb. Diversos estudios lo reconocen como hiperacumulador, alcanzando porcentajes de remoción superiores al 30 % frente a otras especies como *Zea mays* (Jiménez, 2020). Además, su bajo costo, fácil manejo y adecuada adaptación a las condiciones locales justifican técnicamente su elección en comparación con otras plantas utilizadas en fitorremediación.

Por tanto, evaluar su eficacia en el contexto del relleno sanitario de Andahuaylas permitirá fundamentar su aplicación como herramienta ambiental para la restauración de suelos contaminados con Cd y Pb y contribuir al reaprovechamiento seguro del área en el futuro.

### **Problema general**

¿Es posible cuantificar el porcentaje de remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) mediante el uso del girasol (*Helianthus annuus L.*) como agente fitorremediador en suelos contaminados provenientes del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas, bajo condiciones experimentales controladas?



### Problemas específicos

- ¿Cuál es la concentración inicial de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en los suelos contaminados provenientes del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas?
- ¿Qué características fisicoquímicas presenta el compost casero utilizado para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio (Cd) y plomo (Pb)?
- ¿Existe una diferencia significativa en la remoción de Cd y Pb durante el crecimiento del girasol (*Helianthus annuus L.*) en suelos con y sin aplicación de compost?

## 2.2. Objetivos

### 2.2.1 Objetivo general

Cuantificar el porcentaje de remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) mediante el uso del girasol (*Helianthus annuus L.*) como agente fitorremediador en suelos contaminados del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas, bajo condiciones experimentales controladas.

### 2.2.2 Objetivos específicos

- Determinar la concentración inicial de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en los suelos contaminados provenientes del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas.
- Determinar las características fisicoquímicas del compost casero utilizado como enmienda en la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio y plomo.
- Comparar la eficiencia de remoción de Cd y Pb en suelos con y sin aplicación de compost durante el crecimiento del girasol (*Helianthus annuus L.*).

## 2.3. Justificación e importancia

La contaminación del suelo por cadmio (Cd) y plomo (Pb) representa un riesgo ambiental creciente en zonas de disposición final de residuos sólidos, y con escasa intervención para su remediación. En el distrito de Andahuaylas, el relleno sanitario, en funcionamiento desde el año 2018, ha acumulado residuos durante más de siete años, y se estima que continuará operando por un periodo aproximado de cinco años más antes de su cierre definitivo.

Ante esta situación, es necesario implementar estrategias de recuperación progresiva del suelo, orientadas a reducir el impacto ambiental generado durante el funcionamiento del relleno. En ese marco, la presente investigación propone el uso del girasol (*Helianthus annuus L.*) como especie fitorremediadora, por tener la capacidad de absorber y acumular metales pesados, especialmente en suelos contaminados.

Asimismo, se evalúa la aplicación de compost casero al suelo, con el objetivo de mejorar las condiciones del suelo y potenciar el proceso de remoción de contaminantes. Esta propuesta se basa en el uso de recursos naturales accesibles, de bajo costo y fácilmente aplicables en contextos locales.

Finalmente, la investigación tiene una clara dimensión social, ya que promueve alternativas sostenibles que pueden ser replicadas por organizaciones locales. Además, proporciona saberes valiosos que respaldan la toma de decisiones respecto al cierre técnico del relleno sanitario, fortaleciendo la gestión ambiental participativa y contribuyendo a la mejora de la calidad de vida de la población de Andahuaylas.

## **2.4. Hipótesis**

### **Hipótesis general**

El uso del girasol (*Helianthus annuus L.*) como agente fitorremediador permite cuantificar un porcentaje significativo de remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en suelos contaminados del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas, bajo condiciones experimentales controladas.

### **Hipótesis específicas**

- Los suelos contaminados provenientes del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas presentan concentraciones detectables de cadmio (Cd) y plomo (Pb) superiores a los límites permisibles.
- El compost casero presenta características fisicoquímicas adecuadas, como contenido significativo de materia orgánica, que permiten su uso como enmienda

en la fitorremediación de suelos contaminados con Cd y Pb.

- La aplicación de compost mejora significativamente la eficiencia de remoción de Cd y Pb durante el crecimiento del girasol (*Helianthus annuus* L.), en comparación con los suelos sin compost.

## **2.5. Variables**

### **Variable dependiente:**

- Fitorremediación con el cultivo de girasol (*Helianthus annuus* L) en condiciones de cultivo controlado.

### **Variable independiente:**

- Remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) con y sin compost casero.

**Tabla 1***Operacionalización de variables*

| Variable                                                                                                        | Tipo          | Dimensión                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Indicadores                                                                                                                                                                                                              | Unidad de medida                                                                                 | Instrumento/ técnicas                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fitorremediación con el cultivo de girasol ( <i>Helianthus annuus L.</i> ) en condiciones de cultivo controlado | Dependiente   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crecimiento foliar, evaluado a los 30, 60 y 120 días.</li> <li>• Altura de planta, evaluado a los 30,60 y 120 días.</li> <li>• Desarrollo radicular, evaluado a los 30,60 y 120 días.</li> <li>• Condiciones de cobertura (uso de mulch plástico negro).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conteo de hojas por planta</li> <li>• Altura total (tallo- flor) (cm)</li> <li>• Longitud de raíz (cm)</li> <li>• Aplicación de cobertura con mulch (plástico negro)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• cm</li> <li>• cm</li> <li>• cm</li> <li>• cm</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinta métrica</li> <li>• Ficha de campo</li> <li>• Observación directa</li> </ul>                                                |
| Remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) con y sin compost casero                                                   | Independiente | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración de Cd y Pb (a los 30 días).</li> <li>• Concentración de Cd y Pb (a los 60 días).</li> <li>• Concentración de Cd y Pb (a los 120 días).</li> </ul>                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración de Cd y Pb en el suelo contaminado</li> </ul>                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ppm</li> <li>• ppm</li> <li>• ppm</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espátula de acero inoxidable</li> <li>• bolsas de ziploc</li> <li>• marcador permanente.</li> <li>• Ficha de muestreo</li> </ul> |

*Nota.* La fitorremediación será evaluada a través de la comparación de las concentraciones de metales pesados (cadmio y plomo) en el suelo experimental, tomadas en tres momentos del cultivo del girasol (*Helianthus annuus L.*) a los 30, 60 y 120 días. Los análisis químicos se realizarán exclusivamente al suelo con y sin compost, sin considerar los tejidos vegetales. Las variaciones en las concentraciones de los metales pesados reflejarán la capacidad fitorremediadora del girasol, así como el uso de mulch agrícola (plástico negro) como tratamiento complementario.

### III. Marco teórico

#### 3.1. Antecedentes

##### A nivel internacional:

Ramos (2023) en el cantón Camilo Ponce Enríquez, Ecuador, realizó un estudio cuyo objetivo fue evaluar la eficiencia del *Helianthus annuus* L. como agente fitorremediador en relaves mineros contaminados con plomo. Se emplearon tres tratamientos con diferentes densidades de siembra (2, 4 y 6 plantas/m<sup>2</sup>) más un testigo sin plantas, bajo un diseño experimental con cuatro réplicas. Se evaluaron variables morfológicas, encontrando diferencias significativas en altura y número de hojas, pero no en el diámetro del tallo. Al finalizar el experimento, se evidenció una disminución significativa en la concentración de plomo en el suelo, siendo el tratamiento con densidad estándar (4 plantas/m<sup>2</sup>) el más eficiente, logrando una remoción del 79.91 %. El estudio concluye que el girasol tiene alta capacidad para la fitorremediación de terrenos con contaminación de plomo.

Obando et al. (2024), en Ecuador, realizaron el estudio titulado “Fitorremediación en suelos contaminados por cadmio para mitigar el metal pesado”. El objetivo fue determinar la calidad de suelos contaminados en contacto con aguas del río Cutuchi mediante análisis fisicoquímicos. La metodología consistió en evaluar la eficiencia del *Helianthus annuus* L. como planta fitorremediadora durante su ciclo de vida (90 a 125 días), considerando dos puntos de muestreo: Pastocalle y Mulaló. Los resultados mostraron que ambos suelos presentaron inicialmente concentraciones de cadmio de 1.5 mg/kg y, después del tratamiento, se redujeron a 1 mg/kg, alcanzando una remoción del 33.33 %. Se concluyó que el girasol presenta una capacidad moderada para el saneamiento de terrenos que tienen contaminación por cadmio.

Jiménez (2020) en Ecuador, evaluó la eficacia de *Helianthus annuus* y *Zea mays* en la remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en suelos agrícolas contaminados. Los hallazgos mostraron que las dos especies presentaron capacidad de absorción a

concentraciones de 300 mg/kg, siendo *Helianthus annuus* más eficiente en la fitoextracción de Pb con una remoción del 33 %, frente al 18 % de *Zea mays*. Se concluye que el girasol tiene un alto potencial como especie fitoextractora de Pb, debido a su capacidad de acumulación y tolerancia, mientras que el maíz actúa principalmente como fitoestabilizador de Cd. En ambos casos, se recomienda una disposición final adecuada del material vegetal para evitar riesgos ambientales.

Clemente et al. (2021) en Huancayo Peru, realizaron una investigación con el objetivo de establecer la acumulación, distribución y tolerancia de cadmio (Cd) en *Helianthus annuus* L.. La metodología consistió en desarrollar dos experimentos en maceteros bajo condiciones de invernadero. En el primer ensayo se aplicaron concentraciones de Cd de 0, 10, 15, 20 y 25 mg/kg de suelo, evaluándose la altura de planta, producción de materia seca y concentración de Cd en raíces, tallos, hojas y flores durante 84 días. En el segundo ensayo se utilizó una concentración de 20 mg/kg de Cd, evaluándose la acumulación del metal a los 35, 49, 63, 75 y 84 días. Los resultados mostraron que el incremento de Cd en el suelo aumentó la acumulación del metal en la planta, principalmente en las raíces, sin afectar significativamente la altura ni la biomasa, evidenciando alta tolerancia ( $IT = 1$ ). Se concluyó que el girasol actúa como una especie fitoestabilizadora, debido a que presenta un factor de bioconcentración mayor a 1 y un factor de traslocación menor a 1 en concentraciones de hasta 25 mg Cd/kg de suelo.

Munive, et al. (2020) desarrollaron un estudio experimental en campos agrícolas del Valle del Mantaro, Perú, con el objetivo de evaluar la absorción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) mediante *Helianthus annuus* L. en suelos contaminados tratados con compost y vermicompost. El trabajo se llevó a cabo bajo un diseño totalmente aleatorio con tres tratamientos (compost, vermicompost y control) y tres repeticiones, analizándose la concentración de metales en suelo y tejido vegetal mediante digestión ácida y espectrofotometría de absorción atómica. Los resultados mostraron que la aplicación de enmiendas orgánicas aumentó la biodisponibilidad de Cd y Pb, favoreciendo una mayor

acumulación en el girasol y mayor producción de biomasa con respecto al control. En la discusión, los autores concluyen que las enmiendas orgánicas mejoran la estructura del suelo y promueven procesos de fitoextracción sin afectar el desarrollo de la planta, así que la mezcla de compost y girasol constituye una alternativa viable, económica y ambientalmente para la restauración de terrenos contaminados con prácticas sustentables.

#### **A nivel nacional:**

Calderón G. (2022) en el sector Chambac, distrito de Santa Cruz, Cajamarca, realizó una investigación con el objetivo de evaluar la fitorremediación mediante *Helianthus annuus* L. en suelos agrícolas contaminados con plomo (Pb) y cadmio (Cd). La metodología correspondió a un estudio aplicado con diseño cuasiexperimental, utilizando una muestra de 13 kg de suelo distribuida en cuatro macetas (3.25 kg cada una), con densidades de siembra de 2, 4 y 6 plantas, además de un tratamiento testigo sin plantas. El periodo de evaluación fue de 21 días, considerando previamente 15 días para la germinación y trasplante. Los hallazgos mostraron que el tratamiento con mayor densidad de siembra (6 plantas) presentó la mayor eficiencia de remoción, alcanzando una reducción de 65.9 % para Pb y 19.85 % para Cd. Se concluyó que el girasol posee alta capacidad de acumulación de metales pesados, especialmente plomo, sin afectar significativamente su desarrollo.

Bendezu, B. (2021) llevó a cabo un experimento ex situ en Lima para evaluar la eficiencia de remoción de cadmio (Cd) en suelos contaminados mediante fitorremediación con *Helianthus annuus* (girasol) y *Medicago sativa* (alfalfa). El estudio consistió en tratamientos con 2, 4 y 6 plantas de cada especie, así como combinaciones entre ambas, durante un periodo de 40 días. Los resultados mostraron que *H. annuus* alcanzó eficiencias de remoción de 87 %, 86 % y 100 % con 2, 4 y 6 plantas, respectivamente; mientras que *M. sativa* logró 95 % y 99 % con 4 y 6 plantas, respectivamente. En el tratamiento combinado, la eficiencia fue de 92 % y 99 %, dependiendo del número de plantas utilizadas. Se concluyó que ambas especies mostraron un alto potencial fitorremediador, siendo el

girasol el más eficiente.

Castañeda (2022) propuso la fitorremediación con los cultivos de maíz y girasol en terrenos contaminados por (plomo, arsénico, mercurio, cadmio) en el depósito municipal de Lucma, utilizando un método de investigación no experimental, transversal y descriptivo. En los resultados se determinó que: estadísticamente, la fitorremediación ha producido una remoción significativa de estos metales, ya que los valores de p-valúe determinados para estos metales son inferiores al nivel de significancia de 0.05. Además, se registraron porcentajes de eliminación para el Plomo de 41.51%, 43.47% y 44.44%; para el Arsénico de 49.96%, 49.23% y 50.39%; y para el Mercurio de 50.26%, 59. Además, se llevó a cabo la comparación con los (ECAs), previo y posterior a la implementación de la fitorremediación. Para concluir, tanto el maíz como el girasol son efectivos fitoremediadores eficaces, dado que eliminan de manera significativa los metales pesados del terreno.

Alarcón y Rodríguez (2025) en el parque río seco Arequipa evaluaron la fitorremediación con *Helianthus annuus L.* en asociación con *Pseudomonas spp.* para la remoción de plomo (Pb) y cromo (Cr) en suelos contaminados. El estudio identificó concentraciones iniciales de 150 mg/kg de Pb y 80 mg/kg de Cr. Mediante un diseño experimental desarrollado durante 70 días, se emplearon cepas de *Pseudomonas spp.* con tolerancia a metales pesados y se analizaron sus efectos en combinación con el girasol. Los resultados mostraron una remoción del 75 % de Pb y 60 % de Cr en los suelos tratados, en comparación con solo 20 % y 15 % respectivamente en los tratamientos sin bacterias. Además, se evidenció un incremento del 50 % en la actividad de la enzima peroxidasa y del 40 % en la ascorbato peroxidasa en los tejidos vegetales tratados. Se concluye que la interacción planta-microorganismo mejora significativamente la eficiencia de remoción de metales y promueve la recuperación de suelos contaminados, constituyéndose en una estrategia sostenible para la rehabilitación de ecosistemas degradados.

Espinoza (2019) en su investigación realizada en el distrito de Sicaya, región Junín,



llevó a cabo un estudio sobre la fitorremediación de suelos contaminados con plomo ( $Pb^{2+}$ ) utilizando la planta *Helianthus annuus* L. (girasol), evaluando su eficiencia mediante la aplicación de diferentes enmiendas orgánicas y comerciales en condiciones experimentales controladas. El diseño comprendió cuatro tratamientos: un testigo sin abono, abono comercial (superfosfato triple), abono orgánico (estiércol de ovino) y abono de chala. Como resultado, el girasol tratado con abono comercial logró una remoción del 71.82 % de plomo, disminuyendo la concentración inicial de 185.25 ppm a 52.19 ppm, valor inferior al Estándar de Calidad Ambiental (70 ppm); mientras que el tratamiento con estiércol de ovino alcanzó una remoción del 62.68 %. El estudio concluye que el girasol, en combinación con abonos, especialmente comerciales, presenta un alto potencial como agente fitorremediador en terrenos con contaminación de metales pesados.

#### **A nivel local:**

En el ámbito local no se registran estudios sobre el uso de *Helianthus annuus* L. para la fitorremediación de Cd y Pb en suelos de rellenos sanitarios, evidenciando un vacío de información regional. Por ello, esta investigación se sustenta en antecedentes nacionales e internacionales y genera datos científicos nuevos obtenidos directamente en Andahuaylas.

### **3.2. Bases teóricas**

#### **3.2.1. Fitorremediación**

Según Pilon & Smits (2005), la fitorremediación es el uso de plantas y sus microorganismos asociados para la limpieza ambiental de contaminantes, constituyéndose en una alternativa no invasiva y de bajo costo frente a métodos tradicionales de remediación.

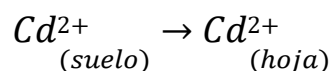
#### **3.2.2. Tipos de fitorremediación con girasol (*Helianthus annuus* L.)**

##### **a) Fitoextracción**

Esta técnica consiste en la absorción de metales pesados por las plantas, permitiendo su posterior cosecha y eliminación. El girasol ha demostrado alta capacidad

para acumular cadmio (Cd) y plomo (Pb) en sus partes aéreas (Salma et al., 2016).

Ejemplo:



#### **b) Fitostabilizacion**

Además de su capacidad fitoextractora, el girasol también contribuye a la fitostabilización al inmovilizar metales pesados en el suelo y reducir su movilidad y riesgo de lixiviación (Ghosh & Singh, 2005).

#### **c) Rizofiltracion**

La rizofiltración utiliza raíces para absorber y retener contaminantes en aguas residuales. El girasol puede aplicarse en sistemas hidropónicos para remover metales como Cd y Pb, especialmente en ambientes acuáticos o efluentes industriales (Salt et al., 1998).

#### **d) Fitovolatilizacion**

Aunque el girasol no destaca en este mecanismo, algunas especies pueden absorber contaminantes y liberarlos en forma volátil mediante la transpiración. Este proceso es más común en elementos como mercurio (Hg) o selenio (Se), pero no se considera relevante para la fitorremediación de cadmio (Cd) o plomo (Pb) con girasol (Prasad, 2004).

#### **e) Aplicabilidad en la investigación**

El girasol (*Helianthus annuus L.*) ha demostrado alta eficacia en la fitoextracción de metales pesados, acumulando Cd y Pb en su biomasa aérea sin síntomas visibles de toxicidad. Esta capacidad lo convierte en una especie adecuada para la fitorremediación de suelos contaminados en rellenos sanitarios, zonas mineras y áreas agrícolas degradadas (Ali et al., 2013).

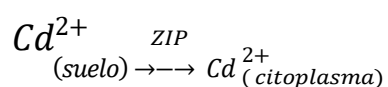
### **3.2.3. Mecanismo de absorción de metales pesados con el girasol**

El girasol (*Helianthus annuus L.*) posee una alta capacidad de absorber y acumular metales pesados como cadmio (Cd) y plomo (Pb), destacando como una especie eficaz

para la fitoextracción. Este proceso involucra mecanismos fisiológicos y bioquímicos que comienzan en las raíces y concluyen con la acumulación de los metales en los tejidos vegetales (Prasad, 2004).

#### **a) Ingreso radicular de los metales pesados**

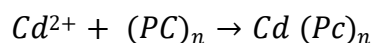
Los metales pesados, al encontrarse en forma iónica en la solución del suelo (como  $Cd^{2+}$  o  $Pb^{2+}$ ), ingresan al sistema radicular por dos rutas principales: la vía apoplástica (entre células y por paredes celulares) y la vía simplástica (a través del citoplasma celular). En la vía simplástica, los iones metálicos atraviesan la membrana celular mediante proteínas transportadoras específicas, como las ZIP o las NRAMP (Clemens, 2006). Una posible representación química del transporte activo de cadmio es la siguiente:



Estos transportadores permiten la entrada selectiva de cationes metálicos al citoplasma para su posterior procesamiento.

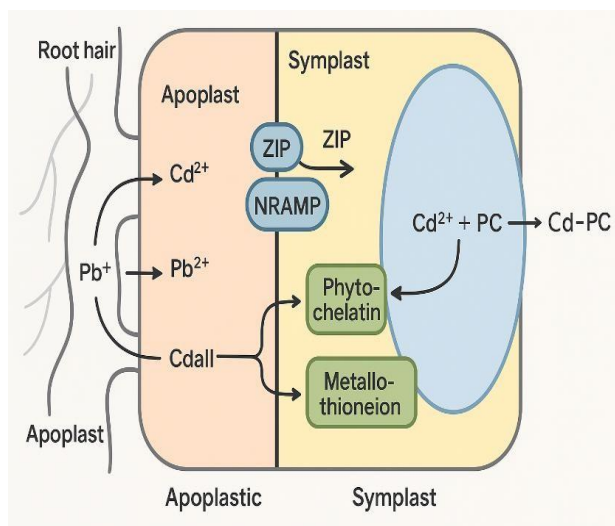
#### **b) Quelación intracelular y detoxificación**

Una vez dentro de la célula, los metales pesados deben ser neutralizados para evitar daños fisiológicos. La planta produce compuestos quelantes como fitoquelatinas y metalotioneínas, que se unen a los iones metálicos, formando complejos estables y no tóxicos (Salón, 2002). Este proceso se representa mediante la siguiente reacción:



Donde  $(PC)_n$  representa cadenas de fitoquelatinas. Este complejo Cd-PC puede almacenarse en vacuolas celulares sin afectar el metabolismo de la célula (Clemens, 2006; Prasad, 2004).

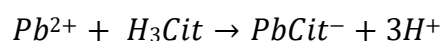
A continuación en la figura N°1, se detallan las reacciones químicas asociadas a los principales mecanismos de fitorremediación.

**Figura 1*****Ingreso radicular y detoxificación intracelular de metales pesados***

*Nota:* En la imagen se describen las siguientes siglas : PC: Fitoquelatinas, compuestos quelantes que neutralizan metales pesados; ZIP y NRAMP: Proteínas transportadoras responsables del ingreso de metales desde el suelo hacia el interior celular; Somplasto: Ruta de trasporte intracelular a traves del citoplasma conectado; Apoplasto: Ruta de trasnpote extracelular, a traves de las paredes celulares y espacios intercelulares. Informacion basada en Clemens (2006), Salón (2002) y Prasad (2004).

**c) Translocación a órganos aéreos**

Tras la quelación, algunos metales son transportados desde las raíces hacia las partes aéreas por el xilema, impulsados por el flujo transpiratorio. Compuestos como el ácido cítrico favorecen su solubilidad y movilidad al formar complejos solubles, como en el caso del plomo (Ali et al., 2013).

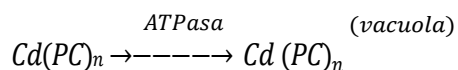


La movilidad varía según el metal: el cadmio se transloca fácilmente hacia las hojas, mientras que el plomo se acumula principalmente en las raíces por su baja movilidad (Liu et al., 2011).

**d) Acumulación en tejidos vegetales**

Finalmente, los metales pesados son almacenados en diferentes partes del girasol.

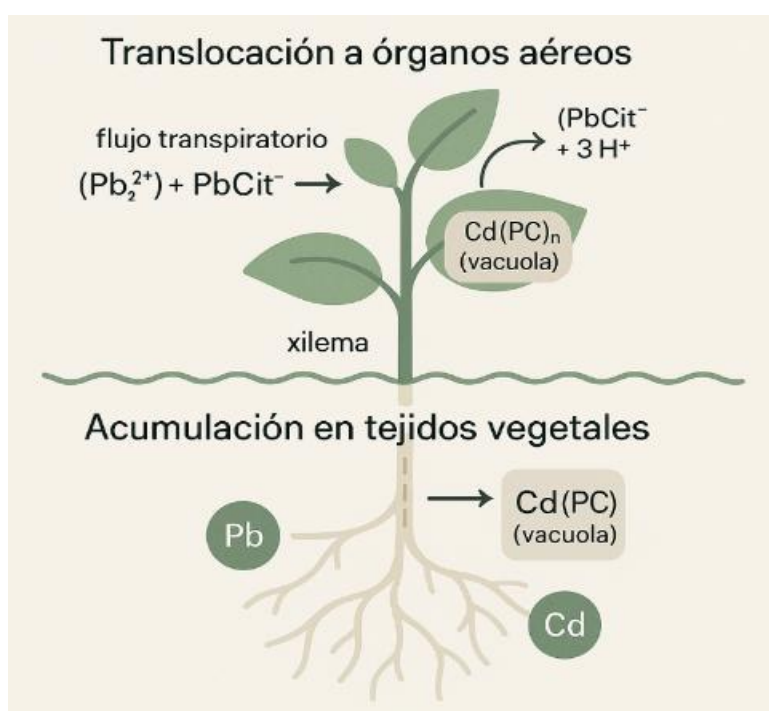
Los complejos Cd–PC, por ejemplo, son transportados hacia vacuolas celulares mediante bombas ATP-dependientes (ATPasa):



La acumulación de metales varía según la especie vegetal y el tipo de metal. En girasol, el cadmio se acumula principalmente en hojas, mientras que el plomo lo hace en raíces (Ali et al., 2013; Prasad, 2004). La Figura 2 muestra los procesos de translocación y acumulación de metales en los tejidos vegetales para facilitar la comprensión de estos mecanismos.

**Figura 2**

*Translocación y acumulación de metales pesados en tejidos vegetales*



*Nota:* En la imagen se describen las siguientes siglas :  $Pb^{2+}$ : Ion de plomo;  $PbCit^-$ : complejo soluble formado entre plomo ,  $(Pb^{2+})$  y ácido cítrico (Cit);  $H_3Cit$ : Ácido cítrico en su forma protonada;  $3H^+$ : Iones de hidrógeno liberados durante la quelación;  $Cd(PC)$ : Complejo de cadmio con fitoquelatinas (PC, péptidos quelantes que neutralizan metales); ATPasa: Enzima transportadora que utiliza ATP para mover los complejos metálicos hacia las vacuolas. Información basada en Ali et al. (2013), Clemens (2006) y Prasad (2004).

### 3.2.4. Girasol (*Helianthus annuus*. L)

El girasol es una planta anual de rápido crecimiento y fácil adaptación, con un sistema radicular profundo y eficiente. Su desarrollo incluye fases de germinación, crecimiento vegetativo, floración y maduración. Se adapta bien a diferentes suelos y climas, lo que lo hace útil en diversos estudios agrícolas (FAO,2003).

#### a) Clasificación botánica del girasol (*Helianthus annuus* L.)

- **Reino:** *Plantae*
- **División:** *Magnoliophyta*
- **Clase:** *Magnoliopsida*
- **Orden:** *Asterales*
- **Familia:** *Asteraceae*
- **Género:** *Helianthus*
- **Especie:** *Helianthus annuus* L.

*Nota:* (USDA, 2023).*Helianthus annuus* L. Germplasm Resources Information Network (GRIN). U.S. Department of Agriculture. <https://npgsweb.ars-grin.gov/>

#### b) Características biológicas del girasol (*Helianthus annuus* L.)

##### **Raíz**

Según Badias (2020), el girasol posee una raíz fibrosa con eje pivotante que puede alcanzar hasta 4 m de profundidad, con ramificaciones robustas y raíces secundarias que exploran capas húmedas del suelo, llegando a extenderse hasta 120 cm en condiciones favorables.

##### **Tallo**

Hernandez (1994) indica que el tallo del girasol es mediano y fuerte, lo que le permite mantenerse firme incluso cuando hay muchas plantas por área. Tiene bastante clorofila durante el llenado del grano y actúa como una reserva de energía, ya que puede mover los carbohidratos acumulados antes de la floración hacia los frutos en desarrollo.

##### **Hojas**

Las hojas son alternas, grandes, trinervas, muy pecioladas y variadas en forma, con un rango de 12 a 40 hojas por planta.

### Flor

Giron (2023) describe que la estructura floral está compuesta por dos tipos de flores: las liguladas, externas y estériles, con una corola similar a un pétalo de color amarillo o anaranjado, y las tubulares hermafroditas, internas, organizadas en espiral con antesis acrópeta.

### Semilla

Girón (2023) señala que el girasol se reproduce mediante polinización cruzada, ya que presenta autoincompatibilidad esporofítica. Luego de la fertilización, la flor se transforma en un fruto tipo cipsela (o aquenio), compuesto por la semilla y un pericarpio seco e indehiscente.

### 3.2.5. suelo

El suelo es un organismo natural que está en constante movimiento formado por minerales, materia orgánica, agua y aire, cuya interacción posibilita el crecimiento de la vida vegetal. Su comportamiento y capacidad productiva dependen de diversas propiedades físicas, entre las cuales destacan la textura, la estructura y el color.

#### a) Textura

Corresponde a la relación proporcional de arena, limo y arcilla. Esta cualidad tiene un impacto directo en la circulación de aire, la infiltración del agua y la conservación de humedad, así como también la disponibilidad de nutrientes esenciales.

**Tabla 2**

*Clase textural del suelo experimental*

| Textura            | Clase textural           |
|--------------------|--------------------------|
|                    | Franco arcilloso         |
| Moderadamente fina | Franco arcilloso arenoso |

*Nota:* Adaptado de *la textura de un suelo*, por Blanquer et al. (2022)

## **b) Estructura**

Se refiere a como se agrupan las partículas sólidas del suelo formando agregados. Esta propiedad condiciona la porosidad, el movimiento de agua y gases, así como el desarrollo de las raíces. La presencia de humedad es un factor clave en su formación y estabilidad.

## **c) Color**

Refleja la composición del suelo, el contenido de materia orgánica, la oxidación de los minerales y la humedad. Es útil para identificar horizontes, determinar procesos de formación y evaluar el estado de drenaje o la presencia de ciertos compuestos, como sales y carbonato.

### **3.2.6. Relleno sanitario**

Es un procedimiento para la disposición final de desechos sólidos que consiste en depositarlos en fosas o celdas excavadas en el suelo, donde los desechos son compactados y recubiertos con tierra o con otro tipo de material. Su propósito es reducir los impactos negativos de los residuos, aunque su eficacia depende de una adecuada gestión técnica. Cuando estas condiciones no se cumplen, pueden generarse lixiviados y emisiones contaminantes que afectan el suelo, el agua y el aire.

### **3.2.7. Metales pesados**

Navarro y Aguilar (2007) explican que los metales pesados no son biodegradables ni se degradan fácilmente mediante procesos naturales, lo que les facilita la acumulación en el suelo, agua y los seres vivos durante largos periodos. Esta persistencia ambiental los convierte en una grave amenaza para la salud de las personas y la vida silvestre. Incluso en concentraciones muy bajas, pueden causar efectos tóxicos en plantas, animales y personas, alterando funciones biológicas esenciales y afectando la productividad agrícola, la calidad del agua y la biodiversidad.



#### **a) Cadmio**

El cadmio (Cd) es un metal pesado altamente tóxico que no cumple función biológica en organismos vivos. Se encuentra comúnmente asociado a minerales de zinc, plomo y cobre, y se emite al entorno, sobre todo a través de actividades humanas, como la fabricación de baterías, pigmentos, plásticos y fertilizantes fosfatados (ATSDR, 2012; MINAN, 2013)

Sus propiedades incluyen ser un metal blando, maleable y dúctil, con masa atómica de 112,4 g/mol, punto de fusión de 321 °C y punto de ebullición de 765 °C. Una vez presente en residuos sólidos, puede migrar al suelo mediante procesos como la lixiviación, donde el agua disuelve compuestos de cadmio y los transporta a capas más profundas, constituyendo una amenaza para la calidad del agua subterránea y el suelo (ATSDR, 2012).

#### **b) Plomo**

El plomo es un metal pesado tóxico, de color gris azulado, con masa atómica de 207,2 g/mol, punto de fusión de 327,4 °C y ebullición de 1 725 °C. Se encuentra en residuos como baterías, pinturas y electrónicos. Su movilidad en el suelo es limitada, ya que tiende a adsorberse a partículas de arcilla, materia orgánica y óxidos metálicos. Sin embargo, puede formar compuestos solubles en suelos ácidos o con presencia de agentes complejantes como cloruros o ácidos húmicos, favoreciendo su lixiviación (Alloway, 2013; Kabata-Pendias, 2011; ATSDR, 2007).

### **3.2.8. Compost casero**

#### **a) Origen**

El compost casero es un abono orgánico elaborado con residuos vegetales domésticos seleccionados, lo que garantiza la ausencia de metales pesados (Satyanarayan & Dharmadhikari, 2004). A diferencia del compost urbano, ofrece mayor control de calidad y es una alternativa segura y sostenible para recuperar suelos degradados.

**b) Características fisicoquímicas**

El compost maduro se distingue por tener un contenido elevado de materia orgánica (>30 %), pH neutro o ligeramente alcalino (6.5–8.0), buena retención de agua y nutrientes, y un equilibrio de macronutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio. Estas propiedades mejoran la capacidad productiva del suelo y favorecen el crecimiento saludable de las plantas (Bernal et al., 2009).

**c) Ventajas del Compost**

- Es de bajo costo y accesible para productores locales.
- Promueve la agricultura sostenible y la economía circular.
- Reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos.
- No aporta contaminantes al suelo ni altera los resultados experimentales.
- Es compatible con estrategias de remediación ecológica.

**d) Interacción del compost en los procesos de fitorremediación**

El compost aporta materia orgánica rica en grupos funcionales (como carboxilos y fenoles) que son capaces de crear complejos estables con los metales pesados, afectando su movilidad en el suelo (Bolan et al., 2011) En ciertos casos, esta interacción reduce la toxicidad directa del metal hacia la planta, mejorando su tolerancia y permitiendo un desarrollo radicular más profundo y efectivo, lo cual potencia la capacidad de extracción.

Asimismo, la actividad microbiana estimulada por el compost contribuye a procesos como la transformación química de los metales y la mineralización de nutrientes, lo que favorece el crecimiento vegetal y la absorción radicular (Delgado, 2019). Además, el compost mejora las condiciones fisicoquímicas del sustrato (porosidad, aireación, capacidad de retención de agua), lo que puede aumentar la biomasa vegetal y, por ende, la eficiencia total de acumulación de metales por planta.

Sin embargo, el efecto del compost sobre la fitorremediación depende del tipo de metal, la dosis aplicada, las características del suelo y la planta utilizada. En el caso del girasol, estudios previos han reportado que la adición de compost puede incrementar la

eficiencia de remoción de metales bajo condiciones controladas, siempre que no se sature el medio con materia orgánica que inmovilice en exceso los contaminantes (Kumpire et al., 2008).

### **3.2.9. Mulch agrícola**

El mucho agrícola es una lámina plástica usada en agricultura para mejorar el suelo y favorecer el crecimiento de los cultivos (Kasirajan & Ngouajio, 2012).

#### **a. Características**

Está elaborado con polietileno de baja densidad, de color negro opaco para bloquear la luz solar. Se presenta en rollos de distintos tamaños y es resistente al rasgado, tracción y degradación solar. Su durabilidad de 3 a 12 meses lo hace ideal para proteger el suelo y favorecer el desarrollo vegetal.

#### **b. Ventajas**

- Facilita el manejo y distribución del riego.
- Contribuye a optimizar la calidad y el rendimiento de las cosechas.
- Reduce la compactación del suelo al evitar la formación de costras superficiales.

#### **c. Interacción mulch agrícola en la fitorremediación**

El uso de mulch en cultivos de fitorremediación como el girasol (*Helianthus annuus* L.) mejora la eficiencia fitoextractora al reducir la competencia de malezas, conservar la humedad y elevar la temperatura del suelo (Parviainen et al., 2020; Chibuike & Obiora, 2014). Estas condiciones favorecen el desarrollo foliar y radicular, incrementando la biomasa y el potencial de eliminación de metales pesados como Cd y Pb (Tangahu et al., 2011). Sin embargo, al ser un material no biodegradable, se recomienda su reciclaje y adecuada disposición para evitar impactos ambientales (Steinmetz et al., 2016).

### **3.3. Definición de términos**

#### **3.3.1. Fijación**

Adriano (2001) define que es un grupo de elementos como metales pesados quedan atrapados en partículas del suelo como arcilla o materia orgánica limitando su movilidad.

#### **3.3.2. Eficacia**

Hernández et al. (2014) señala que es la capacidad de lograr el efecto o resultado deseado, sin importar los recursos utilizados.

#### **3.3.3. Adsorción**

Según la Enciclopedia Britanica (2026 ) es un proceso mediante el cual una sustancia ya sea en estado líquido, gaseoso o iónico, esta incorporado o retenido por otro generalmente un sólido o líquido.

#### **3.3.4. Muestreo**

Otzen y Manterola (2017) indican que es la técnica para elegir una muestra basada en una población estadística. Al seleccionar una muestra aleatoria se busca las características aplicables a una población.

#### **3.3.5. Remoción**

Alloway (2013).menciona que es un proceso de eliminar o sustraer algo de un lugar o contexto determinado

#### **3.3.6. Evaluación**

La evaluación es definida por Otzen y Manterola (2017) como el pproceso para recopilar datos e información que se toma para analizarlo.

#### **3.3.7. Tratamiento**

Bendezu (2021) menciona que es una referencia que se establece para delimitar el objeto de estudio

## IV. Metodología

### 4.1. Tipo y nivel de Investigación

#### a) Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que está orientada a la solución de un problema ambiental concreto: la remediación de suelos contaminados con cadmio (Cd) y plomo (Pb) en el relleno sanitario del distrito de Andahuaylas. En ese sentido, el estudio no solo busca generar conocimiento teórico, sino aportar evidencia experimental que permita evaluar la viabilidad del uso de *Helianthus annuus L.* como alternativa de fitorremediación en condiciones locales.

#### b) Nivel de investigación

El estudio corresponde al nivel explicativo, ya que pretende determinar la relación causal entre la aplicación de tratamientos (suelo contaminado con y sin compost) y el desarrollo morfológico del girasol, así como su efecto en la reducción de las concentraciones de Cd y Pb en el suelo. De esta manera, se busca explicar el comportamiento de las variables bajo condiciones controladas.

#### c) Enfoque de investigación

El enfoque es cuantitativo, dado que se fundamenta en la medición objetiva de variables morfológicas (altura de planta, número de hojas, longitud foliar y radicular) y concentraciones de metales pesados, cuyos datos fueron sometidos a análisis estadístico para la contrastación de hipótesis.

#### d) Diseño de investigación

La investigación adoptó un diseño experimental, específicamente un Diseño Completamente al Azar (DCA), en el que los tratamientos se les asignaron aleatoriamente

las unidades experimentales, permitiendo controlar la variabilidad y garantizar la validez estadística de los resultados.

Las unidades experimentales estuvieron constituidas por macetas de plástico con capacidad de 18 L, acondicionadas con perforaciones en la parte inferior para ayudar al drenaje. Cada maceta contuvo tres plantas de *Helianthus annuus* L., estableciéndose un total de seis unidades experimentales (véase Tabla N.º 3).

**Tabla 3**

*Composición y distribución de los tratamientos 1 y 2 en el diseño experimental*

| Numero de Tratamiento | Descripción del tratamiento        | Nº de macetas |
|-----------------------|------------------------------------|---------------|
| 3                     | Suelo contaminado + compost casero | 3             |
| 3                     | Suelo contaminado sin compost      | 3             |
| <b>Total</b>          |                                    | <b>6</b>      |

*Nota:* La incorporación de compost casero permitió optimizar la fertilidad del terreno y promover el crecimiento de *Helianthus annuus* L. Además, se utilizó mulch plástico negro para evitar el crecimiento de malezas y optimizar la retención de humedad en el suelo (Ramakrishna et al., 2006; Lamont, 2005).

#### **4.2. Ámbito temporal y espacial**

El estudio se desarrolló desde abril hasta noviembre de 2024. En abril se tomaron las muestras iniciales de suelo contaminado, las cuales fueron enviadas para su análisis a la Facultad de Agroforestería de la Universidad Agraria La Molina, determinando la concentración inicial de Cd y Pb. En mayo se instalaron los tratamientos experimentales y se realizó la primera evaluación analítica del sustrato bajo cultivo. Posteriormente, en julio se efectuó la segunda evaluación, y finalmente, en noviembre Se realizó el análisis final para establecer las concentraciones residuales de metales pesados.

La fase experimental se desarrolló en el relleno sanitario del distrito de Andahuaylas, utilizando macetas de capacidad 18 L acondicionados como unidades experimentales, ubicados en el área georreferenciada con coordenadas UTM (ver Tabla N.º 4).

**Tabla 4**

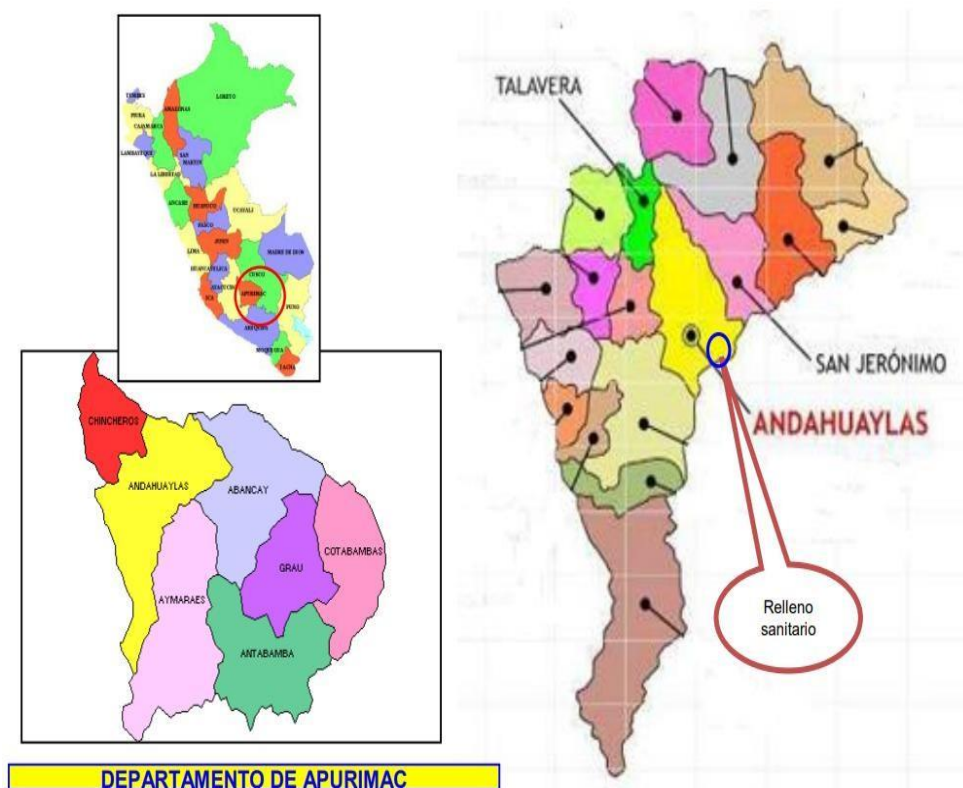
*Coordenadas UTM del relleno sanitario*

| Coordenadas UTM-DATUM WGS 84 zona 18L |        |         |             |
|---------------------------------------|--------|---------|-------------|
| Descripción                           | Este   | Norte   | Altitud (m) |
| Ubicación                             | 676903 | 8488488 | 3169        |

*Nota.* Información obtenida de LOAYZA (2019)

**Figura 3**

*Mapa de ubicación del relleno sanitario de Andahuaylas*



*Nota.* Imagen reproducida de (FICHTNER, 2015)

### **4.3. Población, muestra y muestreo**

#### **Población:**

Relleno sanitario del distrito de Andahuaylas.

#### **Muestra:**

El procedimiento de muestreo se llevó a cabo de acuerdo a los criterios técnicos definidos en el manual para toma de muestras de suelos, lo que permitió recolectar 90 kg de suelo contaminado con metales pesados (cadmio y plomo) en diversas zonas del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas, garantizando así la representatividad del material experimental.

#### **Muestreo:**

La toma de muestras de suelo se realizó considerando una separación de 15 a 20 m lineales a lo largo del perímetro del área excavada. Adicionalmente, se incluyeron dos puntos de muestreo en la zona central, con el fin de asegurar una adecuada representatividad espacial del área total evaluada, que comprende 28,741.36 m<sup>2</sup>, siguiendo los criterios establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014). Esta estrategia permitió obtener un muestreo representativo del suelo contaminado.

Se establecieron 45 puntos de muestreo, identificados desde PM1 hasta PM45 (véase Tabla 5 y Anexo G), los cuales fueron distribuidos estratégicamente a lo largo del perímetro del relleno sanitario, que presenta una extensión aproximada de 784.88 m. Esta distribución permitió reflejar las variaciones espaciales del suelo contaminado en el área de estudio.

En cada punto de muestreo se extrajeron aproximadamente 2 kg de suelo, empleando herramientas adecuadas, con el objetivo de garantizar la integridad y representatividad del material recolectado. El muestreo se efectuó a una profundidad de



40 cm, dentro de un radio aproximado de 30 cm, en cumplimiento de las recomendaciones establecidas por el MINAM (2013).

**Tabla 5**

*Ubicación geográfica y cantidad de muestra por punto de muestreo*

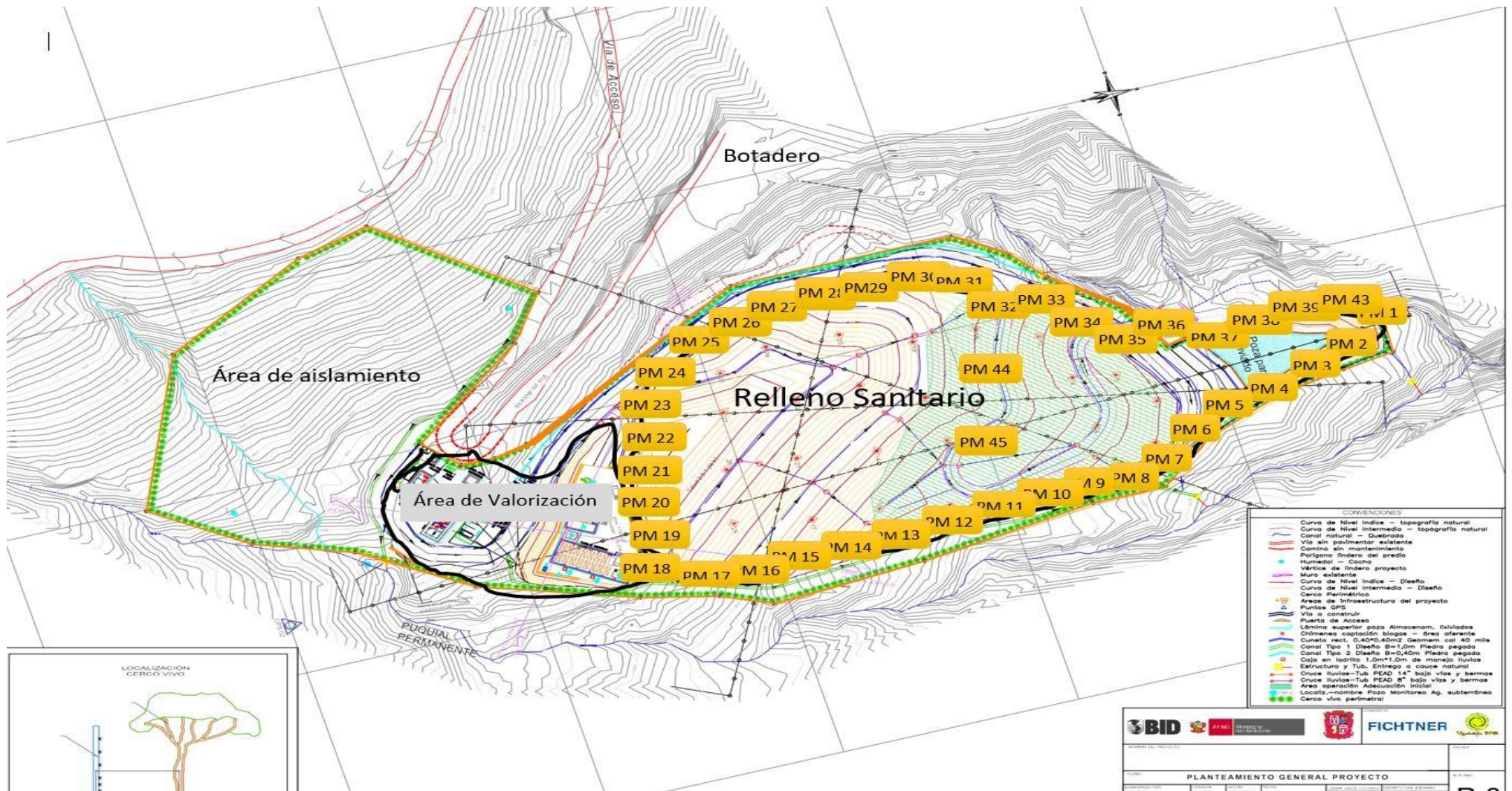
| Punto de Muestreo | Coordenadas (UTM)   | Muestra (kg) |
|-------------------|---------------------|--------------|
| PM1               | Zona: 18L           | 2            |
|                   | Este: 676946.00mE   |              |
|                   | Norte: 8488863.00mS |              |
|                   | Elevación: 3136 m   |              |

*Nota: Elaboración propia con base en el trabajo de campo.*

La Figura 4 presenta una vista geoespacial del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas, en la cual se delimita claramente el perímetro del área evaluada y se identifican con precisión los puntos de muestreo georreferenciados mediante coordenadas UTM.

Figura 4

Ubicación de los puntos de muestreo



Nota. La metodología de muestreo se basó en el plano del expediente de la empresa (FICHTNER, 2015), utilizado para definir la ubicación precisa de los puntos de muestreo.

## 4.4. Instrumentos

### Técnicas de recolección de datos

- Observación
- Análisis de laboratorio
- Protocolo de muestreo

### Instrumentos de recolección de datos

- Ficha de registro
- Cadena de custodia

## 4.5. Procedimientos

### A. Recolección de muestras

Para la recolección de muestras de suelo contaminado se utilizaron los siguientes materiales: pala, pico, machete, balanza de precisión, wincha y costales.

Para la recolección de muestras desde el PM1 hasta PM45, se inició con la georreferenciación de cada punto mediante coordenadas UTM. Luego, se delimitó un área circular de 30 cm de radio. Una vez ubicado el punto, se retiró la cobertura vegetal utilizando un machete y se excavó el suelo hasta una profundidad de 40cm con la ayuda de un pico.

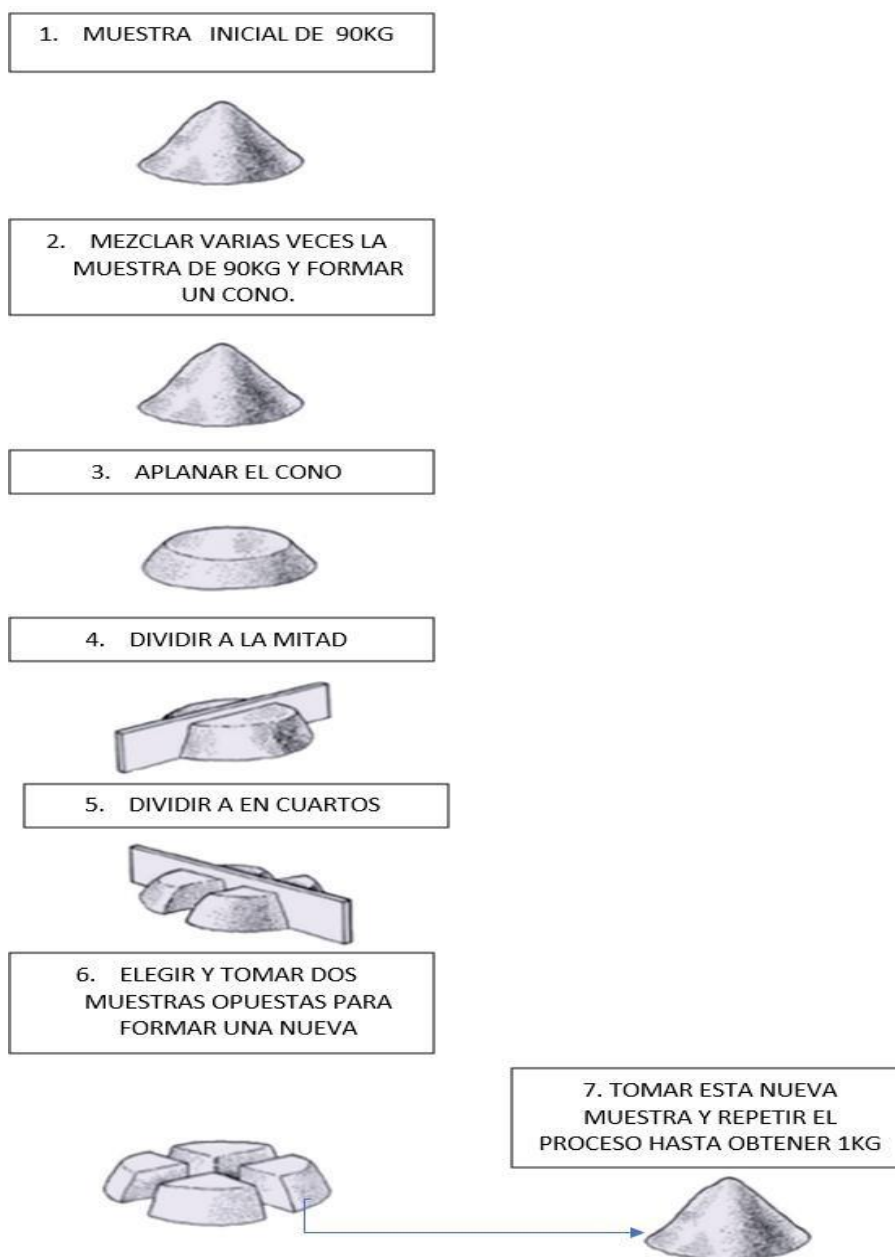
En cada punto de muestreo se extrajeron aproximadamente 2 kg de suelo, los cuales fueron recolectados manualmente mediante el uso de una pala, pesados con una balanza de precisión y almacenados en costales debidamente acondicionados. Como resultado del proceso de muestreo, se logró recolectar un total de 90 kg de suelo, representativo del relleno sanitario.

Una vez obtenidos los 90kg de suelo contaminado, se procedió a la homogenización del material. La mezcla se realizó manualmente con una pala, aplicando tres volteos sucesivos para asegurar una distribución uniforme de las partículas.

Posteriormente, se aplicó la técnica del cuarteo, siguiendo la guía de muestreo de suelos (véase Figura N° 5), con la finalidad de obtener una muestra representativa de 1 kg de suelo. Esta muestra fue debidamente etiquetada y enviada al laboratorio para la determinación de las concentraciones iniciales de cadmio (Cd) y plomo (Pb).

**Figura 5**

*Aplicación de la técnica del cuarteo para la obtención de una muestra representativa de 1 kg de suelo.*



*Nota: imagen adaptada de (S.A, 2024)*

## B. Instalación del Campo Experimental

Para la instalación del campo experimental se utilizaron los siguientes materiales: lampa, martillo, malla Raschel, yeso, cordel y estacas de madera.

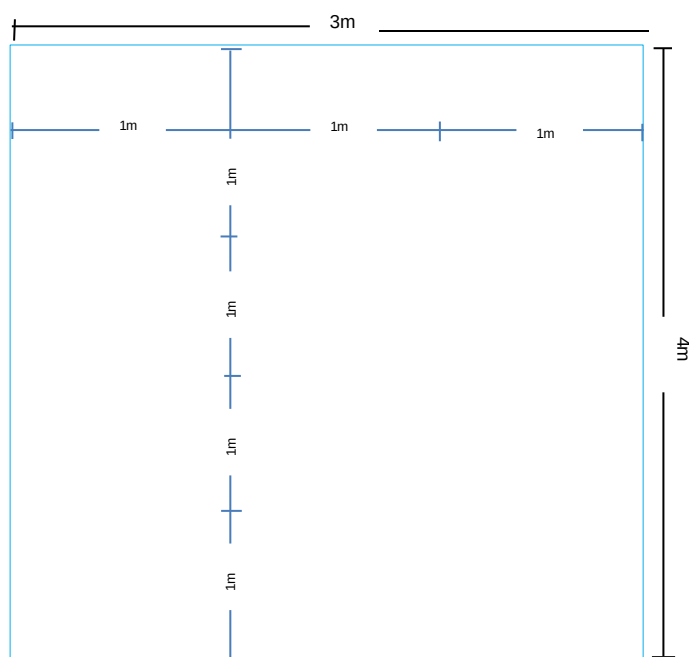
El vivero fue instalado en el “antiguo botadero” del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas, ocupando un área de 12 m<sup>2</sup>. Inicialmente, se marcó el perímetro con yeso, delimitando el terreno. Luego, se realizó la limpieza total del área, eliminando malezas con el uso de la lampa.

Se colocaron estacas de madera en cada esquina del área de cultivo para servir como guías en el tensado del cordel, lo que permitió una alineación precisa de la estructura. En los vértices se instalaron postes de soporte de 2 metros de altura, sobre los cuales se fijó la malla Raschel como cobertura superior.

A continuación, se presentan las características del campo experimental:

**Figura 6**

*Delimitación e instalación del campo experimental.*



*Nota:* Elaboración propia

## **C. Implementación del Área experimental**

### **Elaboración y manejo del compost casero**

Para la elaboración del compost se utilizaron exclusivamente residuos orgánicos de origen doméstico, previamente seleccionados y libres de materiales inorgánicos. Los materiales empleados, cáscaras frescas de frutas (naranja, plátano, manzana y mandarina), restos de hortalizas (lechuga, coliflor, espinaca, apio y brócoli) y cáscaras de huevo crudo, estas últimas incorporadas como fuente de calcio y micronutrientes.

### **Adecuación del área de compostaje**

El proceso de compostaje se desarrolló en un área de 12 m<sup>2</sup>, acondicionada dentro del antiguo botadero del relleno sanitario, en un sector previamente delimitado. Las actividades realizadas comprendieron la limpieza y nivelación del terreno mediante herramientas manuales (lampa, pala y pico), la instalación de una estructura de compostaje con tablas de madera que permitió una adecuada aireación del material, y la colocación de un plástico en la base con la finalidad de evitar el contacto directo del material orgánico con el suelo y prevenir posibles procesos de contaminación cruzada.

### **Manejo y maduración del compost**

Durante el proceso se utilizaron herramientas básicas, tales como un balde de 18 L, una espátula metálica y utensilios de corte manual. El balde fue empleado para el traslado y dosificación del material orgánico hacia el área de compostaje, mientras que la espátula permitió la extracción eficiente de los residuos adheridos al interior del recipiente, asegurando un manejo adecuado del contenido.

Los residuos orgánicos de mayor tamaño fueron troceados con herramientas manuales (machete y cuchillo), con el fin de reducir su volumen, acelerar su descomposición y favorecer una integración homogénea del material.

La base de la pila de compost se construyó con tablas y ramas pequeñas, con el objetivo de asegurar un adecuado drenaje del material. Sobre esta estructura se incorporaron los residuos orgánicos, los cuales fueron mezclados entre dos y cuatro veces mediante el uso de una pala, hasta obtener una masa homogénea y aireada. La pila fue ubicada en un espacio ventilado, con sombra parcial y protegida de la lluvia.

Durante el armado, el material fue humedecido de manera gradual hasta alcanzar una humedad operativa aproximada del 50–60 %, la cual fue verificada semanalmente mediante la prueba manual del “puño”, permitiendo mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana. La aireación del material se realizó cada 7 días, con la finalidad de conservar un ambiente predominantemente aeróbico.

El proceso de descomposición alcanzó su etapa de madurez a las 9 semanas, momento en el cual el material presentó textura estable, color oscuro y ausencia de olores desagradables, obteniéndose finalmente un total de 9 kg de compost seco, el cual fue empleado en los tratamientos correspondientes del experimento.

### **Determinación de la humedad del compost**

La humedad del compost fue determinada mediante el método de secado en estufa, siguiendo la metodología establecida por la AOAC (2000).

#### **Materiales:**

- Papel aluminio
- Cáscaras de frutas (naranja, mandarina, plátano y manzana)
- Pinza metálica
- Pincel
- Cuchillo

#### **Equipos:**

- Estufa de secado
- Desecador con agente desecante (sílica gel)

- Balanza analítica (precisión mínima de 0.01 g)

### **Procedimiento**

Las muestras fueron preparadas mediante troceado en partes uniformes, colocadas sobre papel aluminio previamente tarado y sometidas a secado en estufa a 105 °C durante 24 horas. Posteriormente, las muestras fueron enfriadas en desecador y pesadas hasta obtener peso constante. Los resultados del análisis de humedad.

### **D. Implementación de tratamientos experimentales: con y sin compost**

#### **➤ Tratamiento 1: suelo contaminado con compost casero**

##### **Preparación del suelo:**

Para este tratamiento se emplearon una pala, plástico transparente y una balanza de precisión. El suelo representativo obtenido para el experimento fue de 89 kg, el cual fue extendido sobre una superficie limpia cubierta con plástico para proceder a su fraccionamiento.

La separación del lote se realizó mediante el método de cuarteo, dividiendo el suelo de manera progresiva hasta obtener una porción homogénea de 44,5 kg, cuyo peso fue verificado con la balanza de precisión.

A esta porción se adicionaron 9 kg de compost casero seco, mezclándolos manualmente con la pala hasta lograr una distribución uniforme del material.

El peso total final de la mezcla fue de 53,5 kg, corroborado nuevamente en la balanza antes de su uso en las macetas de polietileno con capacidad de 18L

##### **Llenado de macetas:**

Se utilizaron tres macetas de polietileno de capacidad 18L. En cada maceta se colocaron aproximadamente 17,7 kg de mezcla de suelo, cantidad verificada con balanza



de precisión. Se dejó un margen libre de 3 a 5 cm desde el borde superior para facilitar el riego y permitir la colocación del mulch agrícola, asegurando que el suelo no se derrame y manteniendo la aireación para el crecimiento del girasol.

## **Tratamiento 2: suelo contaminado sin compost**

### **Preparación del suelo:**

Se emplearon las mismas herramientas utilizadas en el tratamiento anterior. A partir del lote representativo de 89 kg, y siguiendo el mismo procedimiento de separación previamente descrito, se obtuvo una fracción de 44,5 kg, cuyo peso fue verificado con la balanza de precisión. Esta porción de suelo fue distribuida sobre un plástico transparente y homogenizada, sin la incorporación de compost.

### **Llenado de macetas:**

Se emplearon tres macetas de polietileno con capacidad de 18 L. En cada maceta se colocaron aproximadamente 15 kg de suelo contaminado, verificados con balanza de precisión. Se dejó un margen libre de 3 a 5 cm desde el borde superior para facilitar el riego y permitir la correcta colocación del mulch agrícola, evitando derrames y asegurando una adecuada aireación del suelo.

### **➤ Procedimientos aplicados en ambos tratamientos**

### **Siembra de *Helianthus annuus* L. (variedad Mammoth Grey Stripe):**

La siembra directa se realizó en cada maceta, utilizando 3 semillas por unidad, a una profundidad de 1,3 cm. La distancia entre semillas se estableció entre 10 y 13 cm, siguiendo las recomendaciones de Sharma et al. (2022) y Salama & Geyer (2023) para evitar competencia entre plántulas y asegurar un desarrollo adecuado. La germinación ocurrió entre los días 8 y 10, de acuerdo con lo reportado para *Helianthus annuus* en condiciones similares.

### Colocación de carteles informativos:

Se instalaron seis carteles informativos (tres por tratamiento), de 40 × 15 cm, elaborados en triplay y fijados con soportes resistentes, para facilitar la identificación dentro del área experimental.

### Instalación del mulch agrícola:

Se utilizaron 4 metros lineales de mulch plástico negro, cortado en secciones de 40 × 40 cm, con un excedente de 2 a 3 cm para su fijación con bandas elásticas o alambre fino. El mulch fue instalado 10 días después de la germinación del girasol.

### Manejo de riego:

El riego se realizó manualmente con agua proveniente de un manantial natural, ubicado en una zona alejada de actividades mineras, industriales o agrícolas intensivas, por lo que se considera con bajo riesgo de contener metales pesados. Se utilizó una regadera de boquilla fina para aplicar el agua de manera uniforme. Para impedir el escurrimiento y la pérdida de lixiviados al suelo, se colocó un lavatorio plástico (31 × 5 × 11 cm) en la base de cada maceta, permitiendo la retención del excedente hídrico. La frecuencia y el volumen de riego se ajustaron según la etapa fenológica del cultivo, tal como se especifica en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Cronograma de riego según la etapa fenológica del girasol*

| <b>Etapas fenológicas</b> | <b>Días después de la siembra</b> | <b>Frecuencia de riego</b> |
|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Germinación               | 0 - 10                            | Cada 2 días                |
| Desarrollo Vegetativo     | 11 - 30                           | Cada 2 días                |
| Desarrollo Vegetativo     | 31 - 60                           | Cada 2 – 3 días            |
| Floración                 | 61 - 90                           | Cada 2 días                |

|                         |           |                 |
|-------------------------|-----------|-----------------|
| Llenado de semillas     | 91 – 110  | Cada 2 – 3 días |
| Precosecha / Maduración | 111 - 120 | Cada 3 días     |

*Nota:* el riego se puede ajustar según el clima. Se recomienda verificar la humedad manualmente antes de cada riego para evitar excesos o deficiencias.

### E. Organización y ubicación de tratamientos en el área experimental

**Figura 7**

*Ubicación de los tratamientos aplicados en el área experimental.*



*Nota:* Elaboración propia

## **F. Procedimiento de recolección del suelo experimental para su análisis en laboratorio**

Para la recolección de muestras experimentales de cada tratamiento se emplearon los siguientes materiales: espátula metálica rígida de 8 cm, guantes de protección y bolsas herméticas tipo Ziploc con capacidad de 1 kg.

### **Identificación de capas del suelo contaminado**

La recolección de muestras se llevó a cabo conforme a la metodología de estratificación recomendada por la FAO (2006; 2009), que establece el muestreo por capas diferenciadas en estudios con suelo en condiciones controladas. Se definieron tres niveles de profundidad:

- Capa superior (0–5 cm): zona de interacción inicial con la rizosfera.
- Capa media (7–13 cm): región intermedia con actividad biológica y concentración de nutrientes.
- Capa inferior (15–20 cm): cercana al fondo del recipiente, útil para evaluar retención de metales y expansión radicular.

Cada capa aportó entre 100 y 150 g de suelo para análisis, permitiendo una caracterización detallada del perfil vertical del sistema experimental.

### **Preparación de la muestra para análisis de laboratorio**

El protocolo seguido para la preparación de las muestras fue el siguiente:

1. Eliminación de materiales orgánicos visibles: se retiraron raíces y otros residuos que pudieran afectar la representatividad del suelo.
2. Separación por capas: se extrajo la muestra respetando los niveles previamente definidos, asegurando la consistencia de la muestra.
3. Homogeneización: las submuestras obtenidas de cada capa fueron mezcladas cuidadosamente en un recipiente limpio, con el fin de obtener

una muestra representativa de cada tratamiento.

4. Fraccionamiento: se tomó una porción representativa de aproximadamente 1 kg de suelo por tratamiento, la cual se colocó en bolsas Ziploc debidamente rotuladas con el nombre del tratamiento y la fecha de recolección. Esta cantidad se consideró suficiente para realizar los análisis de metales pesados, siguiendo criterios de laboratorios acreditados y metodologías de suelos (FAO, 2006).

## **G. Evaluación de metales pesados (Cd y Pb) en el suelo experimental mediante análisis de laboratorio.**

### **1. Primer tiempo de evaluación (30 días)**

Correspondiente a la fase vegetativa temprana del girasol, se extrajo 1 kg de suelo contaminado de la primera maceta de los tratamientos 1 y 2, con el objetivo de medir las concentraciones de plomo (Pb) y cadmio (Cd). En esta etapa se inicia el proceso de fitoextracción temprana, donde las raíces comienzan a absorber metales desde el suelo y transferirlos hacia los tejidos aéreos.

### **2. El segundo tiempo de evaluación (60 días)**

Correspondiente a la fase de crecimiento avanzado, se extrajo 1 kg de suelo contaminado de la segunda maceta de los tratamientos 1 y 2. En esta etapa se presenta una fitoextracción en desarrollo, porque la planta continúa absorbiendo metales. Sin embargo, debido al crecimiento radicular y a los cambios químicos en el suelo, también ocurre fitoestabilización parcial, ya que parte del metal queda retenido en la rizosfera.

### **3. Tercer tiempo de evaluación (120 días)**

Correspondiente a la fase de madurez, con inicio del proceso de senescencia, se extrajo 1 kg de suelo contaminado de la tercera maceta de los tratamientos 1 y 2. A los 120 días se observa la fitoextracción máxima, dado que la planta completa su ciclo vegetativo

y presenta el mayor nivel de acumulación de metales pesados en tejidos foliares y radicales, reflejando la máxima reducción de contaminantes en el suelo.

## **H. Metodología empleada para la cuantificación de Cadmio (Cd) y Plomo (Pb) por espectrofotometría de absorción atómica (AAS)**

### **1. Preparación de la muestra**

- Muestra (suelo) se seca, se tritura finamente y se pesa.
- Luego se somete a digestión ácida, generalmente con una mezcla de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), usando calor.
- El objetivo es disolver los metales y liberar el cadmio contenido en la muestra.

### **2. Filtrado y dilución**

- El digestado se filtra para eliminar residuos sólidos.
- El líquido resultante se lleva a un volumen conocido con agua desionizada o destilada.

### **3. Análisis instrumental**

- La solución se analiza en un espectrofotómetro de absorción atómica (AAS).
- El equipo se calibra previamente con patrones estándar de cadmio.
- La muestra se introduce en el espectrofotómetro, donde se atomiza y se expone a una fuente de luz específica para Cd y Pb (longitud de onda:  $\sim 228.8 \text{ nm}$  y  $\sim 217.0 \text{ nm}$ ).
- El instrumento mide la cantidad de luz absorbida por los átomos de cadmio en la muestra, lo que es proporcional a su concentración.

### **4. Expresión de resultados**

- Los resultados se expresan en mg/kg o ppm (partes por millón) de cadmio y Plomo en la muestra original.

## **I. Cálculo del porcentaje de remoción de metales pesados**

Porcentaje de remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en el sustrato fue calculada utilizando la fórmula propuesta por Joonki et al. (2006), la cual estima el porcentaje de reducción en función de las concentraciones iniciales y finales del metal en el sustrato:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{\text{Valor inicial (ppm)} - \text{Valor final (ppm)}}{\text{Valor inicial (ppm)}} \times 100$$

#### 4.6. Análisis de datos

En este estudio para analizar los datos se utilizó el Excel y SPSS versión 27. El enfoque fue el siguiente:

##### **Plomo (Pb):**

Se evaluó la eficiencia de absorción de plomo a los 30, 60 y 120 días en ambos tratamientos, identificando el intervalo de mayor eficacia. Se aplicaron estadísticas descriptivas y la prueba de Shapiro-Wilk para verificar la normalidad de los datos. Luego, se empleó la prueba t de Student para comparar los tratamientos, determinando diferencias significativas y el tratamiento más eficiente para la remoción de plomo.

##### **Cadmio (Cd):**

De forma similar, la eficiencia de absorción de cadmio se evaluó a los 30, 60 y 120 días en ambos tratamientos. Se aplicaron estadísticas descriptivas y la prueba de Shapiro-Wilk para verificar la normalidad. Posteriormente, se utilizó la prueba t de Student para comparar los tratamientos y determinar cuál fue más eficiente en la remoción de cadmio.

##### **Comparación entre plomo y cadmio:**

Finalmente, se compararon las mejores eficiencias de absorción de plomo y cadmio en los dos tratamientos, con el objetivo de identificar cuál de los dos metales fue removido de manera más eficiente por el girasol.

#### **4.7. Consideraciones Éticas**

La investigación se realizó respetando los principios de integridad científica, responsabilidad ambiental y honestidad académica. No se involucraron seres humanos ni animales, por lo que no fue necesario un consentimiento informado. Se garantizó la gestión correcta de los residuos, el cumplimiento de normas de bioseguridad y la protección del entorno natural.

Este trabajo es original y de autoría propia. Todas las fuentes utilizadas fueron citadas correctamente según el estilo APA (7.<sup>a</sup> edición), respetando los derechos de propiedad intelectual y previniendo todo tipo de plagio



## V. Resultados y discusión

### 5.1. Resultados de la elaboración de compost casero: características físico-químicas y balance de agua y materia seca

#### A. Descripción y composición inicial de los residuos utilizados

La Tabla N°7 muestra la composición inicial de los 117,86 kg de residuos orgánicos utilizados en el compostaje. La selección y proporción de los materiales empleados constituyeron una mezcla apropiada para el desarrollo del proceso de descomposición de la materia orgánica.

**Tabla 7**

*Composición de residuos orgánicos utilizados en la elaboración del compost*

| Tipo de residuo            | Descripción                    | Cantidad (Kg) | Nutrientes principales             |
|----------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------------------|
| Cascaras de frutas frescas | naranja                        | 11.11         | Potasio (K),<br>Azúcares naturales |
|                            | plátano                        | 33.37         |                                    |
|                            | manzana                        | 11.17         |                                    |
|                            | mandarina                      | 28.82         |                                    |
| Restos de verduras limpias | lechuga americana              | 8.5           | Nitrógeno (N),<br>calcio, magnesio |
|                            | coliflor sin tallo y sin hojas | 9             |                                    |
|                            | espinaca blanca                | 5             |                                    |
|                            | apio, tallo sin hojas          | 5             |                                    |
| Cáscaras huevo gallina     | brócoli                        | 5             | Calcio (Ca)                        |
|                            | limpia y crudo                 | 0.89          |                                    |
| <b>Total</b>               |                                | <b>117.86</b> |                                    |

*Nota:* Todos los residuos listados son de origen doméstico y considerados seguros para compostaje.

## B. Humedad

La determinación del contenido de humedad se realizó utilizando la fórmula propuesta por Joonki et al. (2006), según señalado en la página 52.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{perdida de agua}}{\text{peso fresco inicio}} \times 100$$

En las Tablas N° 8 y 9 se presentan los resultados del porcentaje de humedad, calculados mediante la fórmula mencionado, tanto para cáscaras de frutas como para restos de verduras frescas de origen doméstico.

**Tabla 8**

*Resultados de humedad (cascara de frutas)*

| Muestras             | Peso neto fresco (g)<br>Dia 1 | Peso neto seco (g)<br>Dia 4 | Perdida de agua (g) | % de Humedad estimado | Fracción de % /100 |
|----------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|
| Cascara de naranja   | 42.4733                       | 40.8242                     | 1.6491              | 3.89                  | 0.0389             |
| Cascara de plátano   | 44.3780                       | 42.6681                     | 1.7099              | 3.86                  | 0.0386             |
| Cascara de manzana   | 42.9646                       | 41.3275                     | 1.6371              | 3.81                  | 0.0381             |
| Cascara de mandarina | 45.0257                       | 43.5040                     | 1.5217              | 3.38                  | 0.0338             |

*Nota:* Resultados obtenidos en laboratorio

Ejemplo:

### **Cascara de naranja**

- ✓ Peso fresco = 42.4733g
- ✓ Peso seco = 40.8242g

$$\% \text{ Humedad} = \frac{1.6491}{42.4733} \times 100 = 3.89$$

La cáscara de naranja presenta una humedad del 3.89%, indicando una baja proporción de agua retenida. Del mismo modo las demás muestras se calcularon siguiendo el mismo procedimiento.

**Tabla 9**

*Contenido de agua (para restos de verduras frescas y cascara de huevo)*

| Muestras                       | Peso fresco (g)<br>Dia 1 | Peso seco (g)<br>Dia 4 | Perdida de agua (g) | % de Humedad estimado | Fracción de % /100 |
|--------------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|
| Lechuga americana              | 96.7                     | 3.2                    | 93.5                | 96.6                  | 0.966              |
| Coliflor sin tallo y sin hojas | 105.0                    | 8.8                    | 96.2                | 91.6                  | 0.916              |
| Espinaca blanca                | 85.3                     | 9.0                    | 76.3                | 89.5                  | 0.895              |
| Apio, tallo sin hojas          | 112.5                    | 6.8                    | 105.7               | 94.0                  | 0.94               |
| Brócoli                        | 98.8                     | 10.0                   | 88.8                | 89.9                  | 0.899              |
| Cascara de huevo de gallina    | 63.5                     | 17.7                   | 45.8                | 72.2                  | 0.722              |

*Nota:* Datos extraídos de la tabla de composición de alimentos peruanos (collazos ,2013).

### C. Análisis de contenido de agua y materia seca antes del compostaje

Se aplicó la metodología AOAC (2000) para determinar humedad y materia seca por secado en estufa, calculando el contenido de agua y materia seca mediante multiplicación del peso por el porcentaje de humedad.

Ejemplo:

#### Cascara de naranja

$$11.11 \times 0.0389 = 0.432179 \text{ (kg agua)}$$

$$11.11 - 0.432179 = 10.677821 \text{ (kg materia seca)}$$

**Tabla 10**

*Composición de residuos antes del compostaje*

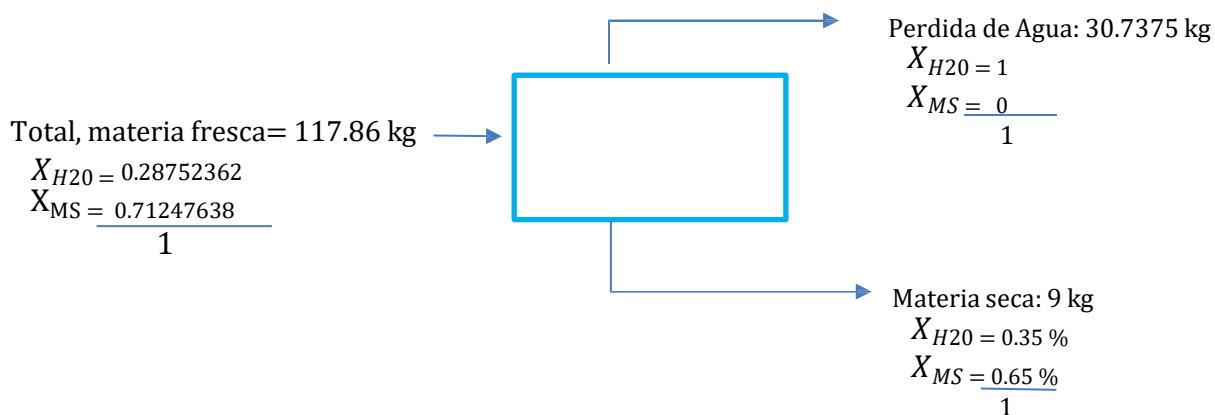
| Cálculo de agua antes de la elaboración del compostaje |                         |                  |                  |
|--------------------------------------------------------|-------------------------|------------------|------------------|
| Muestras                                               | Cantidad requerida (kg) | Kg de agua       | Kg Materia Seca  |
| Cascara de Naranja                                     | 11.11                   | 0.432179         | 10.677821        |
| Cascara de Plátano                                     | 33.37                   | 01.288082        | 32.081918        |
| Cascara de Manzana                                     | 11.17                   | 0.425577         | 10.744423        |
| Cascara de Mandarina                                   | 28.82                   | 0.974116         | 27.845884        |
| Resultados referentes a la tabla de alimentos collazos |                         |                  |                  |
| Lechuga Americana                                      | 8.5                     | 8.211            | 0.289            |
| Coliflor sin tallo y sin hojas                         | 9                       | 8.244            | 0.756            |
| Espinaca Blanca                                        | 5                       | 4.475            | 0.525            |
| Apio, Tallo sin hojas                                  | 5                       | 4.7              | 0.3              |
| Brócoli                                                | 5                       | 4.495            | 0.505            |
| Huevo de gallina entero, crudo                         | 0.89                    | 0.64258          | 0.24742          |
| <b>Total</b>                                           | <b>117.86</b>           | <b>33.887534</b> | <b>83.972466</b> |

*Nota:* Los resultados fueron obtenidos a partir de datos de laboratorio y referencias bibliográficas.

### Balance de materia para determinar la humedad final del abono

$$X_{H_2O} = \frac{\sum T_{H_2O}}{\text{Total materia fresca}} = \frac{33.887534}{117.86} = \mathbf{0.28752362}$$

$$X_{MS} = \frac{\sum T_{MS}}{\text{Total materia fresca}} = \frac{83.972466}{117.86} = \mathbf{0.71247638}$$



#### Balance con respecto al agua

$$117.86 \times 0.28752362 = 30.7375 (1) + 9 (X)$$

$$33.887 = 30.7375 + 9 X$$

$$33.887 - 30.7375 = 9 x$$

$$X = \frac{3.15}{9} = 0.35$$

$$\% = 0.35 \text{ agua}$$

#### Balance de materia seca

$$3.1 \text{ kg de agua} = 0.35\%$$

$$X \cdot 3.15 = 5.85$$

$$X = \frac{5.85}{9} = 0.65\%$$

$$X = 0.65\%$$

Durante el compostaje, el contenido de humedad se redujo hasta un 35 %, valor considerado adecuado para el compost según Jiménez & García (2005). De los 83,97 kg de materia seca inicial, se conservaron 5,85 kg en el compost final, representando aproximadamente el 65 % del peso total

Esta pérdida de materia seca se encuentra dentro del rango esperado en procesos de compostaje aeróbico (50–70 %), según Bernal et al. (2009)

## 5.2. Resultados de la concentración inicial de cadmio (Cd) y plomo (Pb), en suelos del relleno sanitario de Andahuaylas.

El valor reportado de Cd y Pb corresponde a un promedio representativo del área muestreada, obtenido mediante la homogenización de 90 kg de suelo de 45 puntos de muestreo y el método de cuarteo. Esta estrategia asegura que la muestra final refleje las condiciones generales del sitio, aunque no se hayan realizado análisis por triplicado. Por tanto, el resultado permite establecer la línea base de concentración de metales pesados, siendo adecuado para la planificación de la fitorremediación. Los resultados se muestran en la Tabla 11

**Tabla 11**

*Concentración inicial cadmio y plomo*

| Parámetros en ppm | Unidad de medida | Valor promedio |
|-------------------|------------------|----------------|
| Cadmio (Cd)       | ppm              | 2,4            |
| Plomo (Pb)        | ppm              | 21             |

*Nota:* Los análisis de Cd y Pb fueron realizados por el laboratorio de Agroforestería de la Universidad Nacional Agraria la Molina, para establecer la concentración base antes de la fitorremediación.

Las concentraciones iniciales de Cd (2.4 ppm) y Pb (21 ppm) reflejan una condición de contaminación compatible con lo reportado en otros estudios realizados en rellenos sanitarios. Pilco Isuiza (2021) reportó niveles de cadmio entre 1.2 y 3.8 ppm, mientras que Torres Quispe (2018) halló concentraciones de plomo entre 18 y 60 ppm en suelos afectados por la disposición de residuos urbanos. Esta coincidencia confirma que la presencia de metales pesados en el sitio de estudio responde a la acumulación progresiva de residuos y procesos de lixiviación, lo que justifica la implementación de técnicas de fitorremediación para reducir su concentración y mitigar riesgos ambientales en el largo plazo.

### 5.3. Evaluación del desarrollo agronómico de *Helianthus annuus* L. y su capacidad de remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb)

#### A. Instalación de mulch agrícola (día 10)

Diez días después de la siembra directa del girasol en macetas de polietileno con capacidad de 18 L, las plántulas presentaron entre tres y cuatro hojas verdaderas. En esta etapa se procedió a la instalación de mulch agrícola plástico negro en ambos tratamientos (con y sin compost), cubriendo la superficie del suelo en cada unidad experimental.

La instalación del mulch agrícola plástico negro permitió conservar la humedad del suelo y reducir la germinación de malezas, lo cual coincide con lo reportado por Jiménez et al. (2015), quienes señalan que este tipo de cobertura favorece el desarrollo inicial de las plantas.

#### B. Desarrollo morfológico del girasol (día 30)

El tratamiento con compost (T1) evidenció un mejor desarrollo morfológico que el tratamiento sin compost (T2), destacando en altura, número de hojas, longitud foliar y profundidad de raíz (ver Tabla 12).

**Tabla 12**

*Evaluación morfológica del girasol (*Helianthus annuus* L.) (día 30)*

| Tratamiento | Nº de macetas | Nº de plantas / maceta | Altura (cm)  | Nº de hojas  | Longitud de hojas (cm) | Longitud raíz (cm) |
|-------------|---------------|------------------------|--------------|--------------|------------------------|--------------------|
| Con compost | 3             | 3                      | 39.50 ± 0.70 | 11.37 ± 0.84 | 24.57 ± 0.51           | 24.57 ± 0.51       |
| Sin compost | 3             | 3:                     | 19.10 ± 0.17 | 7.00 ± 1.00  | 11.57 ± 0.51           | 16.23 ± 1.15       |

*Nota.* La longitud foliar se determinó mediante la medición de tres hojas representativas (basal, media y apical) por planta, siguiendo el criterio de evaluación morfológica propuesto por Ritchie et al. (1997) y FAO (2003), a fin de representar de manera precisa el desarrollo vegetativo del girasol.

El compost aporta materia orgánica y mejora la estructura del suelo, lo que se traduce en mayor disponibilidad hídrica y mayor actividad biológica, factores que pueden contribuir a un desarrollo vegetal más eficiente (Ali et al., 2013). Por su parte, el mulch agrícola ayudó a mantener la humedad y estabilidad térmica del suelo, condiciones asociadas con un mejor desempeño fisiológico de las plantas (Lamont, 2005; Kasirajan & Ngouajio, 2012).

➤ **Remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) a los 30 días**

**Tabla 13**

*Concentración removida de cadmio (Cd) y plomo (Pb) a los 30 días*

| Tratamiento | Concentración de cadmio en el suelo (ppm) | Eficiencia de remoción (%) | Concentración de plomo en el suelo (ppm) | Eficiencia de remoción (%) |
|-------------|-------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|----------------------------|
| Con compost | 2,3                                       | 4,17                       | 19                                       | 9,52                       |
| Sin compost | 2,3                                       | 4,17                       | 19                                       | 9,52                       |

*Nota.* La evaluación se realizó únicamente al suelo experimental de cada tratamiento.

A los 30 días, ambos tratamientos (con y sin compost) mostraron porcentajes iguales de remoción: 4,17 % para cadmio (Cd) y 9,52 % para plomo (Pb). Esta remoción se calculó aplicando la fórmula propuesta por Tangahu et al. (2011):

$$\% \text{ Remocion} = \frac{C_{\text{inicial}} - C_{\text{final}}}{C_{\text{inicial}}} \times 100$$

**Donde:**

$C_{\text{inicial}}$  : concentración inicial del metal pesado en el suelo

$C_{\text{final}}$  : concentración después del tratamiento (30 días)

**Cálculos:**

$$Cd: \frac{2.4 - 2.3}{2.4} \times 100 = 4.17\%$$

*El girasol logró reducir ligeramente la concentración de Cd en el suelo, extrayendo 0.1 ppm en 30 días, lo cual representa una remoción temprana, pero limitada.*

$$Pb: \frac{2.1-19}{21} \times 100 = 9.52\%$$

*Se observó una mayor reducción relativa de Pb, equivalente a 2 ppm, lo que sugiere una mayor facilidad de absorción o movilidad inicial del plomo en el sistema radicular del girasol.*

La remoción limitada del Cd (0,1 ppm) es coherente con lo señalado por Clemens (2006), quien indica que este metal requiere mayor desarrollo radicular para incrementar su movilidad y absorción. En cambio, el Pb mostró mayor reducción (2 ppm), lo cual coincide con lo mencionado por Ali et al. (2013), quienes señalan que el plomo suele ser retenido rápidamente en la rizosfera en las primeras semanas, aun antes de una fuerte translocación hacia la parte aérea.

El hecho de que ambos tratamientos presentaran la misma remoción sugiere que, en esta etapa, el factor determinante fue la capacidad fisiológica inicial del girasol, y que los efectos del compost suelen manifestarse con mayor claridad en etapas posteriores del cultivo, cuando el sistema radicular incrementa su volumen y capacidad de captación.

### **C. Desarrollo morfológico del girasol a los 60 días**

En la fase vegetativa avanzada, las plantas de girasol tratadas con compost (T1) alcanzaron un desarrollo notablemente superior, con alturas promedio de hasta 140 cm, 28 hojas y raíces de 40 cm de longitud. En contraste, el tratamiento sin compost (T2) registró un crecimiento máximo de 80 cm de altura, 20 hojas y raíces de 28 cm (ver Tabla 14).

**Tabla 14**

*Evaluación morfológica del girasol (*Helianthus annuus* L.) a los 60 días*

| Tratamiento | Nº de macetas | Nº de plantas / maceta | Altura (cm)   | Nº de hojas  | longitud de hojas (cm) | Longitud raíz (cm) |
|-------------|---------------|------------------------|---------------|--------------|------------------------|--------------------|
| Con compost | 3             | 3                      | 139.67 ± 0.58 | 27.67 ± 0.58 | 27.33 ± 0.58           | 39.67 ± 0.58       |
| Sin compost | 3             | 3                      | 79.00 ± 1.00  | 19.33 ± 0.58 | 14.83 ± 0.29           | 27.67 ± 0.58       |

*Nota:* Se aplicó el criterio de medición de hojas basal, media y apical para representar con mayor precisión el desarrollo foliar del girasol (Ritchie et al., 1997; FAO, 2003).



A medida que avanza el desarrollo del girasol, el aumento de la biomasa foliar contribuye a intensificar los procesos metabólicos implicados en la fitorremediación. Un mayor número y longitud de hojas amplía la superficie fotosintética, lo que favorece el transporte y acumulación de metales pesados en los tejidos aéreos. Huachen et al. (2021) señalan que un sistema radicular profundo mejora significativamente la absorción de Cd y Pb, especialmente en condiciones de humedad constante como las que genera el mulch agrícola. Esta cobertura contribuye a un entorno más favorable para el crecimiento, manteniendo la humedad y temperatura del sustrato. Adicionalmente, el compost no solo mejora la estructura del suelo, sino que también forma complejos orgánicos con los metales, reduciendo su toxicidad sin impedir su absorción (Walker et al., 2003). Estas condiciones, combinadas con el avance del crecimiento vegetal, explican un mayor potencial de remoción en etapas posteriores del cultivo.

#### ➤ Remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) a los 60 días

**Tabla 15**

*Concentración removida de cadmio (Cd) y plomo (Pb) a los 60 días*

| Tratamiento | Concentración de cadmio en el suelo(ppm) | Eficiencia de remoción (%) | Concentración de plomo en el suelo (ppm) | Eficiencia de remoción (%) |
|-------------|------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|----------------------------|
| Con compost | 1,9                                      | 20,83                      | 17                                       | 19,05                      |
| Sin compost | 2,2                                      | 8,33                       | 18                                       | 14,29                      |

*Nota.* La evaluación se realizó únicamente al suelo experimental de cada tratamiento.

A los 60 días, se observaron diferencias entre tratamientos. Aplicando la fórmula de remoción porcentual de Tangahu et al. (2011):

$$\% \text{ Remocion} = \frac{C_{\text{inicial}} - C_{\text{final}}}{C_{\text{inicial}}} \times 100$$

**Donde:**

$C_{\text{inicial}}$  : concentración inicial del metal pesado en el suelo

$C_{\text{final}}$  : concentración después del tratamiento (60 días)

**Cálculos:**

Cadmio (Cd):

- Con compost

$$Cd: \frac{2.4-1.9}{2.4} \times 100 = 20.83\%$$

- sin compost

$$Cd: \frac{2.4-2.2}{2.4} \times 100 = 8.33\%$$

Plomo (Pb):

- Con compost

$$Pb: \frac{21-17}{21} \times 100 = 19.05\%$$

- Sin compost

$$Pb: \frac{21-18}{21} \times 100 = 14.29\%$$

El tratamiento con compost mostró mayor remoción de Cd (20,83 %) y Pb (19,05 %) en comparación con el tratamiento sin compost (8,33 % y 14,29 %, respectivamente). Esto respalda lo indicado por Angelova et al. (2016), quienes señalan que el compost mejora progresivamente la biodisponibilidad de metales. El desarrollo radicular y foliar del girasol, junto con la humedad y temperatura reguladas por el mulch, favorecieron la absorción (Huachen et al., 2021). Los valores obtenidos se alinean con los rangos de eficiencia reportados por Wei et al. (2021), y confirman que el tiempo de exposición influye directamente en la eficacia del proceso (Tangahu et al., 2011).

**D. Desarrollo morfológico del girasol a los 120 días**

En la fase de madurez, las plantas de T1 alcanzaron promedios de hasta 180 cm de altura, más de 35 hojas, hojas de hasta 30 cm y raíces de hasta 45 cm. En contraste, T2 presentó un desarrollo morfológico más limitado, con valores máximos de 120 cm de altura y 27 cm de raíz (ver Tabla 16).

**Tabla 16***Evaluación morfológica del girasol (*Helianthus annuus* L.) a los 120*

| Tratamiento | N° de macetas | N° de plantas / maceta | Altura (cm)   | N° de hojas  | longitud de hojas (cm) | Longitud raíz (cm) |
|-------------|---------------|------------------------|---------------|--------------|------------------------|--------------------|
| Con compost | 3             | 3                      | 179.67 ± 0.58 | 34.67 ± 0.58 | 29.67 ± 0.58           | 44.67 ± 0.58       |
| Sin compost | 3             | 3                      | 119.00 ± 1.00 | 17.00 ± 1.00 | 18.33 ± 1.53           | 25.67 ± 1.53       |

*Nota.* Se aplicó el criterio de medición de hojas basal, media y apical para representar con mayor precisión el desarrollo foliar del girasol (Ritchie et al., 1997; FAO, 2003).

En este estudio se observó que el tratamiento con compost favoreció un mayor desarrollo foliar y radicular del girasol, lo que indica una mayor capacidad potencial de captación y movilidad de metales desde el sustrato. Este comportamiento coincide con lo descrito por Yan et al. (2020), quienes señalan que un crecimiento más vigoroso mejora el transporte de metales a través de la xilema. Sin embargo, el aporte principal de esta investigación es que demuestra que, aun en un escenario real de relleno sanitario con niveles moderados de contaminación, el girasol puede mantener un crecimiento normal sin signos de estrés, confirmando su viabilidad como fitoremediador en campo. Asimismo, el efecto del compost y el mulch estabilizó las condiciones del suelo, lo que se reflejó en un mejor desempeño fisiológico de las plantas, coincidiendo con lo planteado por Mark y Davery (2009) pero evidenciado empíricamente en este caso.

#### ➤ Remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) a los 120 días

**Tabla 17***Concentración removida de cadmio (Cd) y plomo (Pb) a los 120 días*

| Tratamiento | Concentración de cadmio en el suelo (ppm) | Eficiencia de remoción (%) | Concentración de plomo en el suelo (ppm) | Eficiencia de remoción (%) |
|-------------|-------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|----------------------------|
| Con compost | 1,1                                       | 54,17                      | 12                                       | 42,86                      |
| Sin compost | 1,3                                       | 45,83                      | 14                                       | 33,33                      |

*Nota.* La evaluación se realizó únicamente al suelo experimental de cada tratamiento.

A los 120 días, se observó la mayor diferencia entre tratamientos. Aplicando la fórmula de remoción:

$$\% \text{ Remocion} = \frac{C_{inicial} - C_{final}}{C_{inicial}} \times 100$$

**Donde:**

**$C_{inicial}$**  : concentración inicial del metal pesado en el suelo

**$C_{final}$**  : concentración después del tratamiento (120 días)

**Cálculos:**

Cadmio (Cd):

- Con compost

$$Cd: \frac{2.4 - 1.1}{2.4} \times 100 = 54.17\%$$

- sin compost

$$Cd: \frac{2.4 - 1.3}{2.4} \times 100 = 45.83\%$$

Plomo (Pb):

- Con compost

$$Pb: \frac{21 - 12}{21} \times 100 = 42.86\%$$

- Sin compost

$$Pb: \frac{21 - 14}{21} \times 100 = 33.33\%$$

A los 120 días, el tratamiento con compost alcanzó las mayores remociones: 54,17 % para Cd y 42,86 % para Pb, superando al tratamiento sin compost (45,83 % y 33,33 %, respectivamente). Estos resultados muestran que el girasol registró una mejor respuesta en presencia de compost, lo cual se reflejó en mayor crecimiento y mayor capacidad de remoción de metales del sustrato. Este comportamiento es coherente con estudios como los de Walker et al. (2003) y Hernández et al. (2010), quienes reportan que el uso de compost suele favorecer el desarrollo vegetal en procesos de fitorremediación. Los valores obtenidos superan a los reportados por Obando et al. (2024) y Jiménez (2020), quienes documentaron eficiencias inferiores al 35 % para Cd. En este estudio, la combinación de compost y mulch agrícola permitió mantener un desarrollo vegetal sostenido durante el periodo experimental, lo que se reflejó en mayores porcentajes de remoción a largo plazo.

### E. Eficiencia del girasol (*Helianthus annuus L.*) en la remoción de cadmio

- **Ho:** El uso del girasol (*Helianthus annuus L.*) como agente fitorremediador no permite cuantificar un porcentaje significativo de remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en suelos contaminados del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas, bajo condiciones experimentales controladas.
- **Ha:** El uso del girasol (*Helianthus annuus L.*) como agente fitorremediador permite cuantificar un porcentaje significativo de remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en suelos contaminados del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas, bajo condiciones experimentales controladas.

Para contrastar la hipótesis planteada, primero se ha examinado la normalidad a través de la prueba Shapiro-Wilk para determinar si los datos de eficiencia de remoción de cadmio, según el tratamiento (con y sin compost), siguen una distribución normal. Por ello, para determinar la normalidad se planteó como hipótesis:

- ✓ **Ho:** Los datos sigue un comportamiento normal o paramétrico.
- ✓ **Ha:** Los datos no sigue un comportamiento normal o paramétrico.

Dónde: Sig >0,05 se acepta la Ho y Sig ≤0,05 se acepta la Ha

**Tabla 18**

*Prueba de normalidad para la eficiencia de remoción del cadmio*

| Variable               |             | Shapiro-Wilk |    |         |
|------------------------|-------------|--------------|----|---------|
|                        |             | Estadístico  | gl | Sig.(p) |
| Eficiencia de remoción | Con compost | 0.964        | 3  | 0,637   |
|                        | Sin compost | 0.824        | 3  | 0,174   |

*Nota.* Los datos fueron procesados utilizando el software SPSS v27.

Luego de aplicarse la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la variable eficiencia de remoción de cadmio, se obtuvieron valores de  $p=0.637$  para el tratamiento con compost y  $p=0.174$  para el tratamiento sin compost. Ambos valores son superiores al nivel de significancia ( $p>0.05$ ), por lo que se acepta la hipótesis nula de la prueba de normalidad, indicando que los datos se distribuyen de forma normal.

Este resultado permite emplear pruebas estadísticas paramétricas para contrastar la hipótesis de investigación, como la prueba t de Student.

➤ **Prueba t de Student para muestras independientes**

- ✓ **H<sub>0</sub>:** No existe diferencia en la eficiencia de remoción del cadmio según tratamiento.
- ✓ **H<sub>a</sub>:** Sí existe diferencia en la eficiencia de remoción del cadmio según tratamiento.

Dónde: Sig >0,05 se acepta la H<sub>0</sub> y Sig ≤0,05 se acepta la H<sub>a</sub>

**Tabla 19**

*Prueba t para comparación de medias en la eficiencia de remoción de cadmio.*

| <b>Prueba t para comparación de medias</b> |       |                     |                            |      |    |                  |                      |                                                |
|--------------------------------------------|-------|---------------------|----------------------------|------|----|------------------|----------------------|------------------------------------------------|
| Grupo                                      | Media | Desviación estándar | Error estándar de la media | t    | gl | Sig. (bilateral) | Diferencia de medias | 95% de intervalo de confianza de la diferencia |
| Con compost                                | 26,33 | 3,20                | 1,31                       | 6,94 | 4  | 0,043            | - 6,94               | (-13,32,-0,56)                                 |
| Sin compost                                | 19,33 | 2,19                | 1,19                       |      |    |                  |                      |                                                |

*Nota.* Los datos fueron procesados utilizando el software SPSS v27.

Al aplicar la prueba t de Student para muestras independientes (Tabla 20), se obtuvo un valor  $p = 0.043$ , inferior al nivel de significancia del 5%. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, indicando que existe una diferencia estadísticamente significativa en la eficiencia de remoción de cadmio (Cd) entre los tratamientos con y sin compost.

La media de remoción fue de 26,33 % en el tratamiento con compost y 19,33 % en el tratamiento sin compost, con una diferencia de 6,94 %. Esto evidencia que la presencia de compost incrementó la eficiencia del girasol en la extracción de cadmio.

Desde el punto de vista agronómico, este resultado se justifica porque el compost mejora la estructura del suelo, incrementa la disponibilidad de nutrientes, favorece el intercambio catiónico y promueve la actividad microbiana, factores que incrementan la

movilidad y absorción de metales pesados por las raíces. Esta interpretación coincide con lo reportado por Liu et al. (2009), quienes señalan que la aplicación de compost acelera la biotransformación y la biodisponibilidad de Cd, favoreciendo su transporte hacia las raíces y tejidos de la planta.

Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango reportado por otros estudios con girasol como especie fitorremediadora. Calderón (2022) informó un 38,5 % de remoción de Cd, mientras que Bendezú (2021) alcanzó hasta 59% en suelos tratados con enmiendas orgánicas. Asimismo, Julca Jhach (2022) registró un 40,2 % de remoción, lo que demuestra que, aunque los porcentajes varían entre estudios debido a las condiciones del suelo, la presencia de compost tiende a incrementar significativamente la eficiencia del girasol.

En función de los resultados experimentales y el soporte teórico disponible, la interacción girasol con compost demostró ser una estrategia efectiva para potenciar la extracción de cadmio en suelos contaminados, lo que sustenta su utilidad como alternativa de remediación ambiental en áreas contaminadas por metales pesados.

#### **F. Eficiencia del girasol (*Helianthus annuus L.*) en la remoción de plomo**

- **Ho:** El uso del girasol (*Helianthus annuus L.*) como agente fitorremediador no permite cuantificar un porcentaje significativo de remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en suelos contaminados del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas, bajo condiciones experimentales controladas.
- **Ha:** El uso del girasol (*Helianthus annuus L.*) como agente fitorremediador permite cuantificar un porcentaje significativo de remoción de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en suelos contaminados del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas, bajo condiciones experimentales controladas.

Para contrastar la hipótesis planteada, primero se ha examinado la normalidad a través de la prueba Shapiro-Wilk para determinar si los datos de eficiencia de remoción de plomo, según el tratamiento (con o sin compost), siguen una distribución normal. Por ello, para determinar la normalidad se planteó como hipótesis:

- ✓ **Ho:** Los datos sigue un comportamiento normal o paramétrico.
- ✓ **Ha:** Los datos no sigue un comportamiento normal o paramétrico.

Dónde: Sig >0,05 se acepta la Ho y Sig ≤0,05 se acepta la Ha

**Tabla 20**

*Prueba de normalidad para la eficiencia de remoción del plomo*

| Variable               |             | Shapiro-Wilk |    |         |
|------------------------|-------------|--------------|----|---------|
|                        |             | Estadístico  | gl | Sig.(p) |
| Eficiencia de remoción | Con compost | 0,942        | 3  | 0,537   |
|                        | Sin compost | 0,893        | 3  | 0,363   |

*Nota.* Los datos fueron procesados utilizando el software SPSS v27.

Luego de aplicar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la eficiencia de remoción del plomo (Pb), se obtuvieron valores de  $p = 0.537$  para el tratamiento con compost y  $p = 0.363$  para el tratamiento sin compost. Ambos valores son superiores al nivel de significancia ( $p > 0.05$ ), por lo que no se rechaza la hipótesis nula de la prueba de normalidad, indicando que los datos presentan un comportamiento estadísticamente compatible con una distribución normal.

Este resultado valida el supuesto de normalidad y permite continuar con el contraste de hipótesis mediante pruebas paramétricas, como la prueba t de Student para muestras independientes.



➤ **Prueba t de Student para diferencia de medias**

**Tabla 21**

*Prueba t para comparación de medias en la eficiencia de remoción de plomo.*

| Prueba t para comparación de medias |       |                     |                            |       |    |                  |                      |                                                                |
|-------------------------------------|-------|---------------------|----------------------------|-------|----|------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------|
| Grupo                               | Media | Desviación estándar | Error estándar De la media | t     | gl | Sig. (bilateral) | Diferencia de medias | 95% de intervalo de confianza de la diferencia (-25,71,-35,24) |
| Con compost                         | 23,81 | 17,17               | 9,91                       | 0,387 | 4  | 0,719            | 4,76                 |                                                                |
| Sin compost                         | 19,05 | 12,16               | 7,27                       |       |    |                  |                      |                                                                |

*Nota.* Los datos fueron procesados utilizando el software SPSS v27.

La Tabla 21 presenta los resultados de la comparación de medias de la eficiencia de remoción de plomo entre ambos tratamientos. Se obtuvo un valor  $p = 0.719$ , superior al nivel de significancia ( $p > 0.05$ ), lo que indica que no se registró una diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos. En términos descriptivos, el tratamiento con compost alcanzó una media de 23.81 %, mientras que el tratamiento sin compost obtuvo 19.05 %, con una diferencia absoluta de 4.76 %.

Aunque la diferencia no fue estadísticamente significativa, sí se aprecia una mejora práctica asociada al compost, lo cual sugiere que el aporte de materia orgánica puede favorecer el proceso de fitorremediación mediante mecanismos como incremento de nutrientes, estimulación de actividad microbiana y mejora estructural del sustrato. Este comportamiento ha sido descrito por Liu et al. (2009), quienes reportaron que el compost puede aumentar la biodisponibilidad de metales para su absorción vegetal.

Al comparar estos resultados con estudios previos, se observa que los valores alcanzados (máximo 42.86 % con compost frente a 33.33 % sin compost) se ubican dentro de los rangos reportados en otras investigaciones. Castañeda (2022) halló 41.51 % de remoción de Pb, y Julca Jhach (2022) informó 44 %. Otros estudios, como Calderón (2022)

y Bendezú (2021), obtuvieron eficiencias superiores (65.9 % y hasta 97 %, respectivamente), probablemente debido a suelos con mayor fertilidad o condiciones de operación optimizadas.

En conjunto, los resultados muestran que el girasol posee una capacidad moderada de extracción de Pb en suelos del relleno sanitario de Andahuaylas, y que el uso de compost, si bien no genera una mejora estadísticamente significativa con el tamaño de muestra evaluado, sí incrementa los valores medios de eficiencia y contribuye favorablemente al desempeño del proceso de fitorremediación en condiciones controladas.

#### **5.4. Identificación del tratamiento más eficiente en la remoción de Cd y Pb en sustratos contaminados mediante *Helianthus annuus* L.**

El análisis comparativo permitió determinar el desempeño del girasol en la remoción de Cd y Pb en suelos del relleno sanitario de Andahuaylas. Los resultados muestran que la mayor eficiencia se alcanzó cuando las plantas crecieron en mejores condiciones agronómicas, lo que favoreció la absorción de metales desde el suelo.

Para cadmio (Cd), la concentración se redujo de 2,4 ppm a 1,1 ppm, con una eficiencia de 54,17 %, valor superior al obtenido en el tratamiento convencional (19,33 %). Este comportamiento es consistente con la literatura, que indica que un mayor desarrollo radicular y producción de biomasa incrementan la captación de Cd por *Helianthus annuus*.

En plomo (Pb), la eficiencia alcanzó 42,86 %, frente a 33,33 % en el tratamiento convencional. Aunque la diferencia fue menor que en Cd, se mantuvo la tendencia de mayor remoción en condiciones que favorecieron el crecimiento vegetal, concordando con estudios que señalan la menor movilidad y biodisponibilidad del Pb en el suelo.

Es importante precisar que los elementos agronómicos utilizados (como compost o cobertura de cultivo) no constituyen la variable de estudio principal, sino condiciones

experimentales que optimizaron el crecimiento del girasol y, en consecuencia, su rendimiento como agente fitorremediador.

En conjunto, los resultados indican que *Helianthus annuus* L. mostró mayor eficiencia de remoción para Cd que para Pb, lo cual coincide con las características de movilidad, disponibilidad y absorción diferencial de ambos metales en el sistema suelo planta.

## V.I. Conclusiones

Se concluye que *Helianthus annuus L.* demostró capacidad fitorremediadora en suelos contaminados del relleno sanitario del distrito de Andahuaylas. Para el cadmio (Cd), la concentración inicial de 2,4 ppm se redujo hasta 1,1 ppm al finalizar los 120 días, alcanzando una eficiencia de remoción superior al 50 %, siendo estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ).

En el caso del plomo (Pb), la concentración disminuyó desde 21 ppm hasta valores entre 12 y 14 ppm, logrando una remoción cercana al 40 %. No obstante, la diferencia estadística entre tratamientos no fue significativa ( $p > 0,05$ ), lo que indica una menor eficiencia comparativa respecto al Cd.

Se determinó que el suelo del relleno sanitario presentó una concentración inicial de 2,4 ppm de Cd y 21 ppm de Pb, evidenciando la presencia de metales pesados que justifican la aplicación de técnicas de fitorremediación.

El compost casero presentó condiciones fisicoquímicas adecuadas para su aplicación como enmienda orgánica, contribuyendo a mejorar la estructura y fertilidad del suelo. Estas características favorecieron el desarrollo vegetativo del girasol y potenciaron indirectamente la eficiencia de remoción de metales pesados.

Se concluye que la aplicación de compost influyó positivamente en la eficiencia de remoción de Cd, evidenciándose mayores porcentajes de reducción en comparación con el tratamiento sin compost, con diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ).

En el caso del Pb, aunque se observaron reducciones en ambos tratamientos, no se registraron diferencias significativas entre ellos ( $p > 0,05$ ), lo que sugiere que la movilidad y disponibilidad del plomo en el suelo limitan su remoción, independientemente de la enmienda aplicada.

## VII. Recomendaciones

### ➤ **Aplicación del girasol como agente fitorremediador**

Se recomienda el uso de *Helianthus annuus* L. como especie vegetal eficiente para la remoción de cadmio y plomo en suelos contaminados, debido a su rápido crecimiento y elevada producción de biomasa, que favorecen la extracción de metales pesados.

### ➤ **Monitoreo analítico del sustrato**

Es fundamental realizar análisis químicos del suelo antes y después del proceso de fitorremediación, con el fin de cuantificar la remoción real de metales pesados y validar la eficacia obtenida.

### ➤ **Análisis del tejido vegetal**

Para futuras investigaciones, se sugiere incluir el análisis químico de raíces, tallos y hojas, con el propósito de determinar la distribución y acumulación específica de Cd y Pb dentro de la planta y comprender mejor el mecanismo de fitorremediación.

### ➤ **Escalamiento a condiciones de campo**

Se recomienda replicar esta metodología en parcelas piloto o áreas contaminadas reales para evaluar la viabilidad operativa de la fitorremediación con girasol bajo condiciones ambientales no controladas.

### ➤ **Uso de compost como complemento agronómico**

El compost puede emplearse como enmienda orgánica para mejorar las propiedades del sustrato y favorecer el desarrollo de la planta, contribuyendo indirectamente al proceso de remoción de metales pesados.

### ➤ **Empleo de cobertura plástica (mulch agrícola)**

El uso de mulch plástico puede considerarse como medida de apoyo para reducir la interferencia de malezas y estabilizar las condiciones del suelo, contribuyendo a mejorar el crecimiento del cultivo en ensayos controlados.

## VIII Referencias

- Alaboudi, K. A., Ahmed, B., & Brodie, G. (2018). Fitorremediación de suelos contaminados con Pb y Cd mediante el uso de la planta de girasol ( *Helianthus annuus* ). *Anales de Ciencias Agrícolas*, 45.
- Alaboudi, K. A., Ahmed, B., & Brodie, G. (2018). Fitorremediación de suelos contaminados con Pb y Cd mediante el uso de la planta de girasol ( *Helianthus annuus* ). *Anales de Ciencias Agrícolas*, 127.
- Alarcon, A. M., & Rigrigues, P. M. (2025). Evaluación de la fitorremediación asistida por bacterias autóctonas y *Helianthus annuus* L. para la potencial restauración de suelos contaminados por metales pesados en el Parque Industrial Río Seco. Arequipa: Universidad Catolica de Santa Maria.
- Alarcon, J., Perz, B., & Argota, G. (2020). Coeficiente de Absorción biológico en *zea mays* por exposición a plomo del botadero de residuos sólidos de Quitasol, Abancay-Apurímac, Peru. *bio tiempo*, 2-1.
- Alexander, R. (2022). Remediacion T Tecnología para la Restauracion de suelos Contaminados . *Ambiente*, 7.
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Fitorremediación de metales pesados: conceptos y aplicaciones. *Science Direct*, 881.
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Fitorremediación de metales pesados: conceptos y aplicaciones. *Pub Med*, 112.
- Alloway, B. J. (2013). Metales traza y metaloides en suelos y su biodisponibilidad. *Metales pesados en sueltos*, 150.
- Alva Vela, R., & Ramirez Buiza, C. (2022). Fitorremediación en suelos contaminados de plomo y cadmio utilizando el girasol (*Helianthus annuus*): Revisión sistemática . Universidad Cesar Vallejo, 7.
- Ambiente, M. d. (2014). Guia para Muestreo de Suelos. En M. d. Ambiente, Guia para Muestreo de Suelos (pág. 72). Lima: Perú progreso para todos.

- Angelova, & Violina. (20216). Potencial del girasol (*helianthus annuus* L.) para la fitoremediación de suelos contaminados con metales pesados. ResearchGate, 1-2.
- Armas, S. R., & Ramirez, D. E. (2020). Aplicación del compost, para la absorción de metales pesados usando girasol (*helianthus annuus* L.) en suelos procedentes del distrito de irazola, Perú. Pucallpa: Universida Nacional de Ucayali.
- Asmat, K. Y. (2016). Fitoextracción De Plomo, Zinc y Cadmio de Relaves Mineros Utilizando *Helianthus* . Fitoextracción De Plomo, Zinc y Cadmio de Relaves Mineros Utilizando *Helianthus* , 6.
- ATSDR. (2007). Toxicological Profile for Lead. Agency for toxic Substances and Disease Registry, 583.
- ATSDR. (25 de julio de 2012). Resúmenes de Salud Pública – Cadmio (Cadmium). Obtenido de ATSDR Registry Agency for Toxic Substances and Disease: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs5.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs5.html)
- Avilla, J. A., Avilla, J. M., & Rivas, F. J. (2014). Elcultivo de Girasol. Departamento de Agricultura y Ganaderia, 61.
- Bendezu, S. A. (2021). Remoción de Suelo Contaminado con Cadmio, mediante fitorremediacion *Helianthus annuus* L. y *Medicago sativa* lima,2021. Lima: Universidad Cesar Vallejo.
- Bernal, Albuquerque, & Moral. (2009). Compostaje de estiércol animal y criterios químicos para la evaluación de la madurez del compost. Una revisión. Science Direct, 100.
- Blanquer, J. M., Asencio, S., & Moreno, H. (2022). la textura del suelo . España : Universidad politecnica de valencia.
- Bolan, N., Kunhikrishnan, A., Thagangarajan, R., kumpiene, J., Jinhee, P., Makino, T., & Kirkham, M. (2011). Remediación de suelos contaminados con metales pesados (loides) – ¿Movilizar o inmovilizar? Science Direct, 122.
- Bouzayani, F., Aydi, A., & Abichou, T. (2014). Contaminación del suelo por metales

- pesados en vertederos: mediciones de un depósito de almacenamiento de lixiviados sin revestimiento. Nacional Library of Medicine, 7.
- Britannica, E. (2026). adsorción. Britanica , 1.
- Buida, L., Rafatullah, M., Kerrouche, A., Qutob, M., Alosaimi, A., Alorfi, H., & Hussein, M. (2022). Una revisión sobre la contaminación por cadmio y plomo: fuentes, destino, mecanismos, efectos sobre la salud y métodos de remediación. MDPI, 15.
- C, R. M., S, G. G., Y, Y. M., R, F. P., & Valdiviezo, L. (2020). Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado y remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost. Scientia Agropecuaria, 1-10.
- C. Adriano, D. (2001). Biogeoquímica, biodisponibilidad y riesgos de los metales. Oligoelementos en ambientes terrestres, 75.
- Calderon Guerrero, L. C. (2022). Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Fitorremediación en suelos agrícolas contaminados por, 59.
- Calderon, G. C. (2022). Fitorremediación en suelos agrícolas contaminados por plomo y cadmio utilizando *Helianthus annuus* L. Chiclayo: Unuversidad cesar vallejo.
- Cartaya, O. E., Moreno, A. M., & Guridi, F. (2023). Influencia de Quitomax® en plantas de girasol (*Helianthus annuus* L.) cultivadas en suelo con altos niveles de iones metálicos. Inca instituto nacional o ciencias agricolas, 1-1.
- Castañeda, J. J. (2022). Universidad privada del norte . “capacidad fitorremediadora del maíz y el girasol en suelos contaminados del botadero municipal de lucma , 64.
- Castro, C. (2012). Manual técnico de compostaje doméstico. Lima. PGL, 156.
- Castro, L. (2012). Guía técnica para el manejo de residuos orgánicos y elaboración de compost. ima: Editorial Agroecológica, 85.
- Chibuike, G., & Obiora, S. (2014). Suelos contaminados con metales pesados: efectos sobre las plantas y métodos de biorremediación. ciencia del suelo aplicada y ambiental , 102.
- Clemens. (2006). Acumulación de metales tóxicos, respuestas a la exposición y mecanismos de tolerancia en plantas. Science Direct, 11.



- CLEMENTE, J. M. (2021). Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. *Acta Agronomica*, 170.
- Collazos, R. (2013). Elaboración de compost: guía técnica. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente, 125.
- Cornell, U. (2004). Compost Facility Operator Manual. Master composter manual, 156.
- Criado, M. A. (2025). La sexta parte de las tierras para cultivo del planeta tiene niveles tóxicos de uno o más metales. *EL PAIS*, 15.
- Criado, M., & Angel. (2025). La sexta parte de las tierras para cultivo del planeta tiene niveles tóxicos de uno o más metales. *EL PAIS*, 3.
- Delgado Nuñez, A. (2019). Editorial: Utilización técnica de subproductos como herramienta para controlar la contaminación. *Revista de Gestion Ambiental*, 242.
- Demo, H. A., & Bogale, A. G. (2024). Mejora del rendimiento de los cultivos y conservación de la humedad del suelo mediante prácticas de acolchado en la agricultura de secano. *Facultad de Recursos Naturales y Ciencias Ambientales*, 75.
- Elizabeth, H. J. (2021). Uso del girasol (*Helianthus annuus*) como fitorremediador de suelos contaminados por minería para su uso en practicas agricolas en portovelo. *universidad agraria del ecuador*, 1-96.
- FAO. (2003). Manual de compostaje municipal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Guías FAO*, 85.
- FAO. (2006). guidelines for soil description. food and agriculture organization of the united nations, 109.
- FAO. (2009). guia para la descripcion de suelos . organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación Roma, 2009, 111.
- FAO. (2013). La calidad del compost: criterios, normativas y evaluación. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Guías FAO*, 123.
- FAO. (2013). Manual de Compostaje del Agricultor. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 112.

- FAO. (2015). Manual práctico de compostaje para agricultores. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. fao.org, 87.
- FAO. (2021). Mantener los suelos vivos y saludables es clave para sustentar la vida en nuestro planeta. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 11.
- FICHTNER. (2015). Estudio de Impacto Ambiental Semidetallado del Relleno Sanitariopara las ciudades de Andahuaylas, San Jerónimo y Talavera,Planta de Tratamiento de Residuos Orgánicos y Planta de Separación de Residuos Inorgánicos Reciclables para la ciudad de Andahuaylas,. Proyecto de Desarrollo de Sistemas de Gestión de Residuos Sólidos en Zonas Prioritarias, 419.
- Franco, L. F., Muñoz, P. T., & Garcia, F. G. (2016). los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 9.
- Freepik. (2022). Girasoles: Características, tipos y cuidados. Villaflores, 102.
- Garcia, J. V. (2022). Fitorremediación como alternativa en remoción de metales pesados del suelo: Una revisión teórica. Revista colon ciencias tecnologicas negocios, 11.
- Ghosh, & Simgh. (2005). una revisión sobre la fitorremediación de metales pesados utilización de sus subproductos. Laboratorio de Gestión de Biomasa y Residuos, Facultad de Estudios Energéticos y Ambientales, 115.
- Ghosh, M. (2005). Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados: una revisión. Revistas de la A a la Z, 105.
- Ghosh, M., & Singh, S. (2005). a review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts . Biomass and Waste Management Laboratory, 18.
- Giron, D. J. (2023). Caracterización morfológica de una accesión de girasol silvestre (*Helianthus annuus* L.) con presencia de androesterilidad. Departamento de Agronomía, 35.
- Guerrero, L. C. (2022). Univercidad Cesar Vallejo. Fitorremediación en suelos agrícolas contaminados por, 59.
- Gutierrez, R., Torres, M., & Lopez, M. (2018). Evaluación de la calidad de compost

- orgánico casero y su incidencia en la seguridad ambiental. *Revista de ciencias Ambientales*, 54.
- Hernandez. (1994). el ideotipo de girasol. *acriscientia*, 12.
- Hernandez Henriquez, L. A. (2024). Metales pesados en suelos agrícolas: fuentes, factores influyentes y estrategias de remediación. *toxics MDPI*, 11.
- Hernández Sampieri, R. F. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill Education., 78.
- Hernandez, T., Moreno, J., & Garcia, C. (2010). Soil properties and plant uptake of heavy metals after long-term amendment with composted sewage sludge. *Plant and soil*, 2010.
- Hidden, R., & A. (2018). Report sounds alarm on soil pollution. *FAO*, 4.
- Hlimat, O. (2024). Optimización del abono orgánico y acolchado plástico para mejorar el rendimiento del pepino, el agua del suelo y las condiciones térmicas de un Alfisol en una región húmeda y tropical. *Avances en Agricultura y Biología*, 122.
- Huachen Clemente, J. P., Contreras Medina, J., Pfuño Laura, J., Aguilar Pariona, L. A., & Vilchez Gutierrez, P. P. (2021). Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. var. Sunbright). *Acta Agronomica*, 170.
- Huaranga, M., & Felix. (2021). Fitoextracción de Pb y Cd, presentes en suelos agrícolas contaminados por metales pesados por el rabo de zorro *Lolium multiflorum* L. (Poaceae). *Arnaldoa*, 3.
- Huertos, E. G. (2008). Contaminación de Suelos por Metales pesados. *revista de la sociedad española de mineralogía*, 13.
- Hughes, L. (2024). Las comunidades galesas se enfrentan al legado tóxico de la minería de metales. *FNALCIAL TIMES*, 12.
- Iburton, D. (2025). Salud del suelo: Diferencia entre revisiones. *Wikipedia*, 13.
- Islam Merajul, M., & Sharma Deepa, a. (2024). Phytoremediation as a green and sustainable prospective method for heavy metal contamination: a review. *royal society of chemistry*, 1-20.

- Jimena, M. M. (2020). Capacidad de absorción del girasol (*Helianthus annuus*) en suelos contaminados a diferentes concentraciones de plomo nivel laboratorio . Lima: Universida Peruana Union .
- Jiménez. (2020). Análisis descriptivo del *Helianthus annuus* y *Zea mays* como acumuladores de Cd y Pb para la recuperación de suelos agrícolas contaminados. UPN, 33.
- Jones, S., Bardos, P. R., Kidd, P. S., Mench, M., Leij, F., & Hutchings, T. (2016). Las enmiendas de biocarbón y compost mejoran la inmovilización del cobre y apoyan el crecimiento de las plantas en suelos contaminados. Pub med, 112.
- Joonki, Y., Xinde, C., Qixing, Z., & Lena, Q. (2006). Acumulación de Pb, Cu y Zn en plantas nativas que crecen en un sitio contaminado de Florida. Ciencia del Medio Ambiente Total, 464.
- Julca Jhach J. (2022). Capacidad fitorremediadora del maíz y el girasol en suelos contaminados del botadero municipal de Lucma. trujillo: Universidad privada del norte.
- Kabata, A. P. (2010). Oligoelementos en suelos y plantas: Cuarta edición. ReserachGate, 125.
- Kabata, P., & Pendias, H. (2011). race elements in soils and plantS. CRC Pres, 114.
- Karla, E. G. (2019). Recuperacion de seulos contamiandos con plomo (II) a escala piloto utilizando girasol (*Helianthus annuus* L.) con diversos tipos de abono en el distrito de Sicaya. Facultad de Ingenieria y Arquitectura , 78.
- Kasirajan, S., & Ngouajio, M. (2012). Mantillos de polietileno y biodegradables para aplicaciones agrícolas: una revisión. springer natura Link, 501.
- Kasirajan, S., & Ngouajio, M. (2012). Mantillos de polietileno y biodegradables para aplicaciones agrícolas: una revisión. Agronomia para el desarrollo sostenible , 122.
- Kasirajan, S., & Ngouajio, M. (2012). Mantillos de polietileno y biodegradables para aplicaciones agrícolas: una revisión. Agronomia para el Desarrollo sostenible ,

125.

Kumpire, J., Lagerkvist, A., & Mauricio, C. (2008). Estabilización de As, Cr, Cu, Pb y Zn en el suelo mediante enmiendas: una revisión. *Gestion de residuos*, 225.

Lamont, w. J. (2005). Plásticos: Modificando el microclima para la producción de cultivos hortícolas. *Features*, 5.

Lasat, M. (2021). Fitoextracción de metales tóxicos: una revisión de los mecanismos biológicos. *Calidad Ambiental*, 109.

Liu, & Angelova. (2009). Crecimiento, acumulación de cadmio y zinc en girasol ornamental ( *Helianthus annuus* L.) en suelo contaminado con diferentes enmiendas. *ScienceDirect*, 2-3.

Lui, S., & Guo, M. (2011). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the total Environment*, 140.

macrosource. (2015). Características físicas que tiene un suelo. *Inti fertilizantes* , 4.

Marbut Fletcher, C., Ruffin, E., & Waksman, S. A. (2025). Suelo. *Britannica*, 12.

Mariuxi, J. V. (2020). Análisis descriptivo del *helianthus annuus* y *zea mays* como acumuladores de (cd, pb) para la recuperación de suelos agrícolas contaminados. *universidad agraria del ecuador*, 110.

Mark, F., & Davery, J. (2009). Uso de compost en la remediación de suelos contaminados con metales pesados. *Materiales Peligrosos*, 175.

Mellano, S. C. (2022). Reducción de plomo en suelos contaminados por relaves metalurgicos en la planta UNCP- Yauris mediante fitoextraccion con girasol y enmienda de vermicompost. *Universidad continental*, 108.

Mendoza, R. B., & Espinoza, A. (2017). Guía Técnica para Muestreo de Suelos. *Universidad Nacional Agraria* , 56.

MINAM. (2020). Términos de Referencia para la formulación del Programa de Reconversión y Manejo de Áreas Degradadas por Residuos Sólidos Municipales y la Guía para la formulación del Programa de Reconversión y Manejo de Áreas Degradadas por Residuos Sólidos Municipales. *Guía para la formulación del*

- Programa de Reconversión y Manejo de Áreas Degradadas por Residuos Sólidos Municipales, 94.
- MINAN. (2013). Perfil toxicológico de Cadmio (Cd), Número CAS 7440-43-9. Caracterización ambiental de cadmio en el Perú, 7.
- MINAN. (2014). Guía para Muestreo de Suelos. Dirección General de Calidad Ambiental, 39.
- Moreno, F. H. (2022). ARNALDOA. Cuantificación de Cu, Pb, As y Cd absorbidos por el Girasol *Helianthus annuus* L, presentes en suelos agrícolas por relaves mineros, 18.
- Moreno, M., Moreno, A., & Mancebo, I. (2011). Comparación de diferentes materiales de acolchado en un cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Investigaciones Agrarias, 112.
- Munive, R. G. (2020). Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado y remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost. Ciencia Agropecuaria, 186.
- NIU Zhi, x., SOL Li, n., SUN Tie, h., LI Yu, s., & Hong, W. (2007). Evaluación de la fitoextracción de cadmio y plomo por girasol, ricino, alfalfa y mostaza en cultivo hidropónico. Revista de Ciencias Ambientales, 967.
- Obando, J. A., Amon, A. R., & Sandoval, M. R. (2024). Fitorremediación en suelos contaminados por cadmio para mitigar el metal pesado. Polo del Conocimiento, 10.
- Ogungbile, P. O. (2024). Fitorremediación con girasol (*Helionthus annuus*) y su capacidad para la remoción de cadmio en suelos contaminados. TECNO SCIENTIFICA, 9.
- Onifade, S. T., & Alola, A. A. (2023). Environmental quality outlook of the leading oil producers and urbanized African states. Research article, 12.
- Otzen, T. &. (2017). Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. International Journal of Morphology, 89.
- Parviainen, A., Papaslioti, E. M., & Porcel, M. C. (2020). El antimonio como trazador de

emisiones de tráfico no procedentes de escape en la contaminación atmosférica de Granada (S de España) utilizando bioindicadores liquénicos . contaminación ambiental, 263.

Paul Chandra, P. L., Bell, R. W., & Lennard Barrett, E. G. (2021). Impacto del mantillo de paja de arroz en las propiedades físicas del suelo, la distribución de las raíces del girasol y el rendimiento en un suelo arcilloso afectado por la salinidad. MDPI, 264.

PERUANO, E. (2024). EL PERUANO . Peruanos generamos 21 mil toneladas diarias de basura, 3.

Pilco Isuiza, N. J. (2021). Determinación de la influencia de los lixiviados en la concentración de metales pesados del suelo del botadero municipal de Moyobamba, 2020. Tesis para optar el grado de Ingeniero Ambiental. Facultad de Ecología, Universidad Nacional de San Martín, Tara. Determinación de la influencia de los lixiviados en la concentración de metales pesados del suelo del botadero municipal de Moyobamba, 2020, 124.

Pilon Smits, E. (2005). Fitorremediación. Reseñas anuales , 39.

Pilon, E., & Smits. (2005). Fitorremediación. Annual Reviews, 3.

pngtree. (25 de junio de 2017). fondo belleza botanica de la planta girasol . Obtenido de pngtree: Fondo Belleza Botánica De La Planta De Girasol Foto E Imagen Para Descarga Gratuita - Pngtree

Pocco, J. E. (2023). Evaluacion de la eficiencia de remocion de contaminantes en la planta de tratameinto de aguas residuales del Distrito Jose Maria Arguedas, Andahuaylas - Aprurimac, 2022. Univerisdad Nacional Jose Maria Arguedas, 146.

Prabhat Kumar, R., Sang Soo, L., Ming, Z., & Yiu Fai, T. (2019). Metales pesados en cultivos alimentarios: riesgos para la salud, destino, mecanismos y gestión. Medio Ambiente Internacional, 385.

Prasad. (2004). Heavy Metal Stress in Plants: From Biomolecules to Ecosystems. Second Edition, 15.

Prodipto Bishnu, A., Md Shafiul, I., Shreejana, K., Nafisa, A., Amrit, P., & Shaharia Akter,

- S. (2024). Fuentes, efectos y perspectivas actuales de la contaminación por metales pesados: suelo, plantas y cadena alimentaria humana. *Heliyon*, 7.
- Puckett, J., Byster, L., Westervelt, S., Gutierrez, R., & Davis, S. (2002). The high-tech trashing of Asia. *Basel Action Network. Exporting harm*, 52.
- Ramakrishna, A., Tam, H. M., Wani, S. P., & Long, T. D. (2006). Efecto del mantillo sobre la temperatura del suelo, la humedad, la infestación de malezas y el rendimiento del maní en el norte de Vietnam. *Investigacion de cultivos de campo* , 125.
- Ramos, L. M. (2023).Aanálisis de la fitorremediación de relaves mineros contaminados con plomo utilizando *helianthus annuus* en el cantón camilo ponce . Ecuador : Universidad Agraria del Ecuador .
- Restrepo, S. N., Acevedo, B. L., Henao, M. B., & Pelaez, J. C. (2015). Efecto de remediación del compost sobre la transferencia de mercurio soluble en un cultivo de *Phaseolus vulgaris*. *Pub med*, 152.
- S.A, R. C. (2024). El Cuarteo – Un Muestreo Representativo. *R-Chemical*, 2.
- Salama, K., & Geyer, M. (2023). Películas de plástico para acolchado en la agricultura: su uso, problemas ambientales, reciclaje y alternativas. *Plásticos, microplásticos y nanoplásticos en el medio ambiente*, 179.
- Salma Aslam, A., Tasneem Gul, K., Hassan Imran, A., Mariam Shahzadi, A., & Abdul Haleen, P. (2016). Una nueva microextracción líquido-líquido dispersiva que utiliza una microemulsión basada en líquido iónico acoplada con extracción del punto de enturbiamiento para la determinación de cobre en muestras de suero y agua. *Sciencie Direct*, 192.
- Salón, J. (2002). Mecanismos celulares para la desintoxicación y tolerancia a metales pesados . *Botanica Experimental*, 11.
- Salt, D., Smith, R., & Rskin, I. (1998). Fitorremediación. *Reseñas anuales*, 3.
- Sarmiento-Sarmiento\*, G. (2021). Recuperación de plomo en suelo agrícola. *Scientific anticle*, 14.



- Satyanarayan, S., & Dharmadhikari, D. (2004). Toxicidad de aguas residuales farmacéuticas a base de hierbas en peces — *Lebistes reticulatus* (Peter). Taylor & Francis, 123.
- Schneider, A., & Miller, J. F. (1981). Descripción de las etapas de crecimiento del girasol  
1. Ciencia de los cultivos , 122.
- Sewellam, N. (2014). Fitorremediación de suelos contaminados con plomo y cadmio mediante la aplicación de plantas de girasol. A Academia , 25.
- Sharma, S., Lofton, J., & Murley, C. (2022). Profundidad de siembra y población de girasoles en el Panhandle de Oklahoma. Extension , 15.
- SIGERSOL. (31 de Marzo de 2023). Ministerio del Ambiente. Obtenido de Sigersol:  
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojY2I4Y2YwNmEtM2U0Zi00NTM2LTlIZWetNjFINDc5MWVkbMDQwliwidCI6IjBIMmFiZjRILWExZjUtNDZiZi1iOWE0LWM5YWE2ZGQ1NTE4MCJ9&pageName=55c508f90ed25db0b4cb>
- Soudek, P., Petrova, S., & Vanek, T. (2010). Fitoextracción de metales tóxicos por plantas de girasol y maíz. Alimentacion, Agricultura y Medio Ambiente , 390.
- Steinmetz, Z., Willmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Troger, J., . . . Flor, O. (2016). Acolchado plástico en la agricultura. ¿Intercambiar beneficios agronómicos a corto plazo por degradación del suelo a largo plazo? ciencia del Medio Ambiente Total , 705.
- Tangahu, B. V., Abdullah, S. R., Basri, H. I., & Anuar, N. (2011). Una revisión sobre la absorción de metales pesados (As, Pb y Hg) por las plantas mediante fitorremediación. Revista internacional de ingeniería química , 224.
- Torres Quispe, N. E. (2018). “Evaluación de la concentración de metales pesados como as, cu, cd, hg y pb en el botadero de cancharani de la ciudad de Puno”. tesi una - puno, 122.
- UGRS. (2022). Programa municipal de educacion,cultula y ciudadana ambiental de la municipalidad Provincial de Andahuaylas 2019-2022. Andahuaylas: Municipalidad provicnial de Andahuaylas.

- USDA. (2023). *Heloanthus annuus* L. Germplasm Resources Informacion Network (GRIN).U.S. Departamento of Agriculture, 123.
- USDA, N. (2024). Salud del Suelo. Servicio de Conservacion de Recursos Naturales Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 11.
- Valdes, V. V. (05 de junio de 2023). Rellenos sanitarios. Obtenido de scrib:  
<https://es.scribd.com/document/483297881/Relleno-sanitarios>
- Vera Zelada, P., Vera Zelada, L. A., Minchan Sapo, J. R., & Quiliche Culqui, M. I. (2023). Cinética de metales pesados en lixiviados de un relleno sanitario de Cajamarca, Perú. REACAE, 8.
- Villagrán, R., Radrigán, M., Carrasco, B., & Selles, G. (2010). Efecto del uso de mallas Raschel de diferentes colores sobre variables microclimáticas y fisiológicas en un cultivo de pimiento bajo invernadero. Agrociencia, 672.
- Walker, D., Clemente, R., & Bernal, M. (2003). The effects of organic amendments on heavy metal bioavailability and toxicity in contaminated soils. Soil Use and Management, 220.
- Wei, Q. S., Ullah, S., & Noman, M. (2021). Fitorremediación de suelos contaminados con plomo y cadmio 20201126021602. ResearchGate, 120.
- Wilker, D., Clemente, R., & Bernal, M. (2003). Bioavailability of heavy metals in soils amended with sewage sludge and compost. Chemosphere, 273.
- Yan, W., Tan, M. Y., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Fitorremediación: un enfoque prometedor para la revegetación de tierras contaminadas con metales pesados. Fronteras en la ciencia de las plantas , 112.
- Yiqing, L., Ming, X., Osbert, S., & Wangcheng, C. (2004). Efectos de la exclusión de raíces y hojarasca sobre el eflujo de CO<sub>2</sub> del suelo y la biomasa microbiana en bosques tropicales húmedos. Science Direct, 36.
- Zelada Vera, L. A., Sapo Minchan, J. R., & Culqui Quiliche, M. I. (2023). Cinética de metales pesados en lixiviados de un relleno sanitario de Cajamarca, Perú. Universidad Nacional de Jaen, 80.

Zho, P., Zeng, D., Wang, X., Tai, L., Zhuo, W., Zhuoma, Q., & Lin, F. (2022). Niveles de contaminación y evaluación de riesgos de metales pesados en el suelo de un vertedero: un estudio de caso en Lhasa, Tíbet. MDPI, 10.

Zuñiga, L. M. (2021). Elaboración de compost orgánico con residuos domésticos. Revista Agroindustrial Ciencia y Tecnología. Ciencia y tecnología , 125.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes