

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN

ESCUELA DE POSGRADO

UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE ECOLOGÍA

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS



**Utilización de las especies *Medicago sativa* y *Taraxacum officinale* en la
fitorremediación de plomo, mercurio y cadmio del botadero Yacucalina**

**Tesis para optar el Grado Académico de Maestra en Ciencias
con mención en Gestión Ambiental**

AUTOR:

Ing. Karina Silva Mori

ASESOR:

Dr. Wildoro Ramírez Ramírez

**Tarapoto - Perú
2022**



Esta obra está bajo una [Licencia
Creative Commons Atribución-
NoComercial-Compartirigual 2.5 Perú.](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/)

Vea una copia de esta licencia en
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE ECOLOGÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS



Utilización de las especies *Medicago sativa* y *Taraxacum officinale* en la fitorremediación de plomo, mercurio y cadmio del botadero Yacucatina

**Tesis para optar el grado académico de Maestra en Ciencias
con mención en Gestión Ambiental**

AUTORA:

Ing. Karina Silva Mori

ASESOR:

Dr. Wildoro Ramírez Ramírez

Tarapoto – Perú

2022

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE ECOLOGÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS



Utilización de las especies *Medicago sativa* y *Taraxacum officinale* en la fitorremediación de plomo, mercurio y cadmio del botadero Yacucatina

**Tesis para optar el grado académico de Maestra en Ciencias
con mención en Gestión Ambiental**

AUTORA:

Ing. Karina Silva Mori

ASESOR:

Dr. Wildoro Ramírez Ramírez

Tarapoto – Perú

2022

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE ECOLOGÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS



Utilización de las especies *Medicago sativa* y *Taraxacum officinale* en la fitorremediación de plomo, mercurio y cadmio del botadero Yacucatina

AUTORA:

Ing. Karina Silva Mori

Sustentada y aprobada el 28 de abril de 2022, por los siguientes jurados


.....
Dr. Mario Pezo González
Presidente


.....
Dr. Enrique Navarro Ramírez
Miembro


.....
Dr. Víctor Hugo Muñoz Delgado
Secretario


.....
Dr. Wildoro Ramírez-Ramírez
Asesor

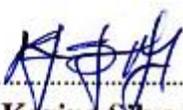
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE ECOLOGÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS



Utilización de las especies *Medicago sativa* y *Taraxacum officinale* en la fitorremediación de plomo, mercurio y cadmio del botadero Yacucatina

**Tesis para optar el grado académico de Maestra en Ciencias
con mención en Gestión Ambiental**

Los suscritos declaran que el presente trabajo de tesis es original, en su contenido y forma.


.....
Ing. Karina Silva Mori
Ejecutora


.....
Lic. Dr. Wildoro Ramírez Ramírez
Asesor

Declaratoria de autenticidad

Karina Silva Mori, con DNI N° 47770214, egresada de la Escuela de Posgrado, Unidad de Posgrado de la Facultad de Ecología, Programa de Maestría en Ciencias con mención en Gestión Ambiental de la UNSM, autora de la tesis titulada: **Utilización de las especies *Medicago sativa* y *Taraxacum officinale* en la fitorremediación de plomo, mercurio y cadmio del botadero Yacucatina.**

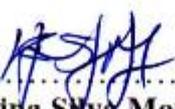
Declaro bajo juramento que:

1. La tesis presentada es de mi autoría.
2. La redacción fue realizada respetando las citas y referencia de las fuentes bibliográficas consultadas.
3. Toda información que contiene la tesis no ha sido plagiada;
4. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido alterados ni copiados, por tanto, la información de esta investigación debe considerarse como aporte a la realidad investigada.

Por lo antes mencionado, asumo bajo responsabilidad las consecuencias que deriven de mi accionar, sometiéndome a las leyes de nuestro país y normas vigentes de la Universidad Nacional de San Martín.

Tarapoto, 28 de abril de 2022.




.....
Karina Silva Mori
DNI N° 47770214

Formato de autorización NO EXCLUSIVA para la publicación de trabajos de investigación, conducentes a optar grados académicos y títulos profesionales en el Repositorio Digital de Tesis

1. Datos del autor:

Apellidos y nombres: <i>Silva Mori Karina</i>	
Doctorado / Maestría / Segunda Especialidad: <i>Maestría</i>	Teléfono: <i>954474225</i>
Correo electrónico : <i>Karina-silva-mori5@gmail.com</i>	DNI: <i>47770214</i>

(En caso haya más autores, llenar un formulario por autor)

2. Datos Académicos

Facultad de: <i>Ecología</i>
Programa de: <i>Maestría en Ciencias con mención en Gestión Ambiental</i>

3. Tipo de trabajo de investigación

Tesis	<input checked="" type="checkbox"/>	Trabajo de investigación	<input type="checkbox"/>
Trabajo de suficiencia profesional	<input type="checkbox"/>		

4. Datos del Trabajo de investigación

Título : <i>Utilización de las especies <i>Medicago sativa</i> y <i>Taraxacum officinale</i> en la fitorremediación de plomo, mercurio y cadmio del botadero Yacucahna.</i>
Año de publicación: <i>2022</i>

5. Tipo de Acceso al documento

Acceso público *	<input checked="" type="checkbox"/>	Embargo	<input type="checkbox"/>
Acceso restringido **	<input type="checkbox"/>		

Si el autor elige el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, una licencia **No Exclusiva**, para publicar, conservar y sin modificar su contenido, pueda convertirla a cualquier formato de fichero, medio o soporte, siempre con fines de seguridad, preservación y difusión en el Repositorio de Tesis Digital. Respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.

En caso que el autor elija la segunda opción, es necesario y obligatorio que indique el sustento correspondiente:

6. Originalidad del archivo digital.

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad Nacional de

San Martín - Tarapoto, como parte del proceso conducente a obtener el título profesional o grado académico, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado.

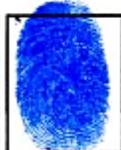
7. Otorgamiento de una licencia *CREATIVE COMMONS*

Para investigaciones que son de acceso abierto se les otorgó una licencia *Creative Commons*, con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a la obra, bajo los términos que dicha licencia implica

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>

El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Digital de Tesis, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.

Según el inciso 12.2, del artículo 12° del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales - RENATI "Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Repositorio Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA".



[Handwritten signature]

Firma y huella del Autor

8. Para ser llenado en el Repositorio Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto.

Fecha de recepción del documento:

04/07/2022



Ing. Grecia Vanessa Fachin Ruiz
Responsable

***Acceso abierto:** uso lícito que confiere un titular de derechos de propiedad intelectual a cualquier persona, para que pueda acceder de manera inmediata y gratuita a una obra, datos procesados o estadísticas de monitoreo, sin necesidad de registro, suscripción, ni pago, estando autorizada a leerla, descargarla, reproducirla, distribuirla, imprimirla, buscarla y enlazar textos completos (Reglamento de la Ley No 30035).

** **Acceso restringido:** el documento no se visualizará en el Repositorio.

Dedicatoria

A Dios por las bendiciones de cada día.

A mis padres, por el apoyo y el gran motor que me permite seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

Dedico este proyecto a mi prometido, quien es vital para la realización de este trabajo, gracias por el apoyo y comprensión.

Karina Silva Mori

Agradecimiento

A mi Sra. madre Mariquita Mori Flores y a mi padre Wilter Silva Saavedra y hermanos que me han apoyado con su constante motivación en mi proceso de estudio.

A las personas profesionales que me han apoyado en todo el proceso de mi tesis, agradecimiento total desde lo más profundo de mi corazón.

El autor

Índice general

Dedicatoria.....	vii
Agradecimiento.....	viii
Índice general.....	ix
Índice de tablas	xi
Índice de figuras	xii
Índice de siglas y abreviaturas	xiii
Resumen	xiv
Abstract.....	xv
Introducción.....	1
CAPÍTULO I.....	3
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.1. Antecedentes del estudio.....	3
1.1.1. Internacionales	3
1.1.2. Antecedentes Nacionales	4
1.1.3. Antecedentes locales.....	6
1.2.1. Metales pesados (plomo, mercurio y cadmio).....	7
1.2.2. Contaminación del suelo por metales pesados	7
1.2.3. Absorción de metales por las plantas.....	8
1.2.4. Fitorremediación.....	9
1.2.5. Fitorremediación de metales pesados	12
1.2.6. Biodisponibilidad de metales pesados en el suelo	13
1.2.7. Factores que afectan la fitorremediación de metales pesados	13
1.2.8. Absorción y transferencia de los metales en la planta	14
1.2.9. Uso de plantas para descontaminar suelos por metales pesados	15
MATERIAL Y MÉTODOS	18
2.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	18
2.1.1. Tipo de investigación.....	18
2.1.2. Nivel de investigación	18
2.1.3. Diseño de investigación.....	18
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	19

2.4.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	19
2.5.	Materiales y Métodos.....	20
2.5.1.	Materiales, equipos y reactivos.....	20
2.5.2.	Métodos	20
	CONCLUSIONES	37
	RECOMENDACIONES.....	38
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
	ANEXOS	46

Índice de tablas

Tabla 1. Descripción del diseño experimental.....	18
Tabla 2. Materiales, equipos y reactivos	20
Tabla 3. Concentración de metales pesados del suelo del botadero	26
Tabla 4. Comparación de la concentración de plomo (mg/kg) entre las dos especies	27
Tabla 5. Comparación de la concentración (mg/kg) de mercurio entre las dos especies	27
Tabla 6. Comparación de la concentración (mg/kg) de cadmio entre las dos especies.....	28
Tabla 7. Prueba T para la concentración de plomo	29
Tabla 8. Prueba T para la concentración de cadmio	29
Tabla 9. Eficiencia de remoción de plomo y cadmio con las dos especies	30
Tabla 10. Eficiencia de remoción de plomo y cadmio con las dos especies	30
Tabla 11. Comparación de las eficiencias de remoción entre las dos especies	31

Índice de figuras

Figura 1. Esquema del diseño de investigación experimental	19
Figura 2. Puntos de muestreo de área contaminada.....	22
Figura 3. Medida de la caja de madera	23
Figura 4. Disposición de las plantas de cada especie en las cajas	24

Lista de siglas y abreviaturas

Cd: Cadmio

ECA: Estándar de Calidad Ambiental

EPA: *Environment Protection Agency*

GORESAM: Gobierno Regional de San Martín

Hg: Mercurio

MINAM: Ministerio del Ambiente

MINSA: Ministerio de Salud

MPSM: Municipalidad Provincial de San Martín

MS: *Medicago sativa*

Pb: Plomo

SB: Suelo de botadero

TO: *Taraxacum officinale*

Resumen

El propósito del presente estudio fue evaluar el potencial de las especies *Medicago sativa* y *Taraxacum officinale* para la remoción de metales pesados (Pb, Hg y Cd) del suelo del botadero de Yacucatina. Para ello, se seleccionó un estudio experimental con dos tratamientos, un testigo (suelo del botadero) y tres repeticiones, haciendo un total de nueve unidades experimentales. La concentración promedio de plomo en el suelo del botadero fue 9,41 mg/kg, este valor, no sobrepasa el Estándar de calidad ambiental de suelo para este metal (70 mg/kg). Asimismo, para la concentración de mercurio, no se pudo determinar valores puntuales, debido a que estuvieron por debajo de los límites de detección del método (<0,1 mg/kg); mientras que, para el cadmio, se encontró una concentración promedio de 5,60 mg/kg, sobrepasando el Estándar de calidad ambiental de 1,4 mg/kg. Luego de aplicar la técnica de fitorremediación, con la especie *M. sativa*, se encontró una concentración promedio de plomo en el suelo del botadero de 8,50 mg/kg, mientras que con la especie *T. officinale*, la concentración de plomo fue 7,39 mg/kg; ambos valores no sobrepasan el Estándar de calidad ambiental de suelo para este metal (70 mg/kg). Asimismo, se encontró una concentración promedio de cadmio en el suelo del botadero de 1,13 mg/kg con *M. sativa*, mientras que con la especie *T. officinale*, la concentración de cadmio fue 1,36 mg/kg; ambos valores no sobrepasan el Estándar de calidad ambiental de suelo para este metal (1,4 mg/kg). Con respecto a las eficiencias de remoción de los metales pesados, la especie *M. sativa* presentó una eficiencia de remoción de plomo del suelo de 9,68%, mientras que con la *T. officinale*, la eficiencia de remoción fue de 21,57%; asimismo, para la remoción de cadmio, la especie *M. sativa*, obtuvo una eficiencia de 79,82%; mientras que con la *T. officinale*, la eficiencia de remoción fue de 75,71%. Finalmente, la especie que retuvo la mayor cantidad de plomo fue *T. officinale*, mientras que, la especie que removió la mayor cantidad de cadmio fue *M. sativa*, por tanto, ambas especies pueden ser utilizadas promisoriamente para descontaminación de suelos por sustancias tóxicas como metales pesados.

Palabras clave: Metales tóxicos, suelo de botadero, plantas fitorremediadoras

Abstract

This study aimed to evaluate the potential of *Medicago sativa* and *Taraxacum officinale* species in the removal of heavy metals (Pb, Hg and Cd) from the soil of the Yacucatina dump. For this purpose, an experimental study was selected with two treatments, a control (dumpsite soil) and three replicates, making a total of nine experimental units. The average concentration of lead in the dumpsite soil was 9.41 mg/kg; this value does not exceed the environmental soil quality standard for this metal (70 mg/kg). Furthermore, it was not possible to determine point values for mercury concentration, since they were below the detection limits of the method (<0.1 mg/kg), while, for cadmium, an average concentration of 5.60 mg/kg was found, exceeding the environmental quality standard of 1.4 mg/kg. After applying the phytoremediation technique with the *M. sativa* species, an average lead concentration of 8.50 mg/kg was found in the dumpsite soil, while with the *T. officinale* species, the lead concentration was 7.39 mg/kg; both values do not exceed the Environmental Soil Quality Standard for this metal (70 mg/kg). Likewise, an average cadmium concentration of 1.13 mg/kg was found in the dumpsite soil with *M. sativa*, while with the species *T. officinale*, the cadmium concentration was 1.36 mg/kg; both values do not exceed the Soil Environmental Quality Standard for this metal (1.4 mg/kg). Regarding the removal efficiencies of heavy metals, the species *M. sativa* presented a soil lead removal efficiency of 9.68%, while with *T. officinale*, the removal efficiency was 21.57%; likewise, for cadmium removal, the species *M. sativa*, obtained an efficiency of 79.82%, while with *T. officinale*, the removal efficiency was 75.71%. Finally, the species that retained the highest amount of lead was *T. officinale*, while the species that removed the highest amount of cadmium was *M. sativa*, therefore, both species can be used promisingly for soil decontamination of toxic substances such as heavy metals.

Key words: Toxic metals, dumpsite soil, phytoremediation plants.



Introducción

Entre los graves problemas ambientales de la actualidad se encuentra la contaminación de los suelos, que resulta de la inadecuada disposición de desechos orgánicos e inorgánicos, tanto de manera intencional como accidental. La acumulación de sustancias en concentraciones indeseables es responsable de graves problemas ambientales, perjudica la capacidad del suelo para realizar sus diversas funciones, culmina en varios problemas de salud para los humanos y afecta a diversas formas de vida.

Asimismo, el suelo es un recurso natural esencial que cuando se contamina puede degradar significativamente los ecosistemas y áreas agrícolas, poniendo en riesgo la vida de los seres vivos, incluyendo el ser humano. Con el aumento de las actividades antropogénicas y el crecimiento poblacional, la contaminación de suelos con metales pesados se ha convertido en un problema de alcance global, como consecuencia de ello, se hace necesario encontrar soluciones para controlar y remediar los daños causados al sistema edáfico. Asimismo, la acumulación de metales pesados en el suelo se ha incrementado rápidamente debido a diversos procesos naturales y antropogénicos.

Por otro lado, la disposición inadecuada de residuos sólidos, influye negativamente en la calidad de vida de la población y trae daños al ambiente, debido a que muchos de los materiales dispuestos en los botaderos poseen elementos potencialmente tóxicos y dañinos a la salud. Los metales pesados tienen gran potencial contaminante debido a su capacidad de alterar las características del suelo y contaminar otros compartimentos ambientales, mediante la migración o movilización de contaminantes, bajo ciertas condiciones. Entre los residuos sólidos, que contienen metales pesados están, las baterías y pilas de variadas composiciones, pigmentos, vidrios, cerámica, aleaciones metálicas, tubos metálicos, tintas, juegos artificiales, fertilizantes, cemento, lámparas y cenizas de carbón; los cuales son materiales que se disponen en los botaderos.

Existen diversas técnicas para la remoción de metales pesados de suelos contaminados, entre ellas las que se basan en procesos físicos, químicos y biológicos, siendo esta última la más aceptada porque presenta menor grado de contaminación. Dentro de las técnicas biológicas se encuentra, la fitorremediación, la cual es una metodología que utiliza especies vegetales para la remoción de contaminantes. Asimismo, es una de las principales

técnicas actualmente disponibles para la remediación de suelos contaminados y se basa en el uso de plantas para remover, inmovilizar o transformar los contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el suelo y en el agua. En el botadero Yacucatina, existe un elevado grado de contaminación del suelo por el contenido de metales pesados, lo que se evidencia por los malos olores, pérdida de cobertura boscosa, migración de especies, formación de charcos fangosos grisáceos y presencia de lixiviados.

La primera etapa del estudio consistió en la visita al lugar de estudio, en la cual se detectó contaminación del suelo por lixiviados, sin embargo, los metales pesados no se pueden observar a simple vista y no se puede confirmar que hay existencia a menos que se haya hecho un estudio que cuantifique los metales, es por ello la motivación de realizar la investigación en el botadero Yacucatina.

El objetivo general del presente estudio: Evaluar la eficiencia de las especies *Medicago sativa* (Alfalfa) y *Taraxacum officinale* (Diente de León) en la fitorremediación de metales pesados (Pb, Hg y Cd) del suelo del botadero Yacucatina, Juan Guerra. Asimismo, como objetivos específicos se tienen:

- Determinar la concentración de los metales pesados (Pb, Hg y Cd) en el suelo del botadero Yacucatina antes de la Fitorremediación con las especies *Medicago sativa* (Alfalfa) y *Taraxacum officinale* (Diente de León).
- Determinar la concentración de los metales pesados (Pb, Hg y Cd) en el suelo (Ex situ) del botadero Yacucatina después de la Fitorremediación con las especies vegetales *Medicago sativa* (Alfalfa) y *Taraxacum officinale* (Diente de León).
- Comparar la eficiencia de las especies vegetales *Medicago sativa* (Alfalfa) y *Taraxacum officinale* (Diente de León) en la remoción de metales pesados en el suelo del botadero Yacucatina.
- El presente estudio tiene como propósito evaluar el potencial de las especies *Medicago sativa* (Alfalfa) y *Taraxacum officinale* (Diente de León) en la fitorremediación de metales pesados (plomo, mercurio y cadmio) del suelo del botadero Yacucatina, Juan Guerra.

CAPÍTULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Antecedentes del estudio

1.1.1. Internacionales

López (2017) desarrolló un estudio titulado “Mezquite (*Prosopis laevigata*) como alternativa para la recuperación de suelos contaminados por cobre”, en la ciudad de Puebla, México. El propósito del estudio fue analizar la capacidad del mezquite *Prosopis laevigata*, para la remediación del suelo contaminado con cobre. Para ello se determinó el porcentaje de germinación de las semillas y luego la capacidad de absorción del metal por los órganos de la planta. Se encontró una concentración de cobre en el tallo de *Prosopis laevigata* 644 mg/kg, el cual es un valor que supera el valor de referencia de la norma mexicana. Se concluye que esta especie es hiper-acumuladora de cobre y puede ser utilizada en la remediación de suelos.

Por otro lado, Pizarro et al., (2015) realizaron un estudio titulado “Especies Forestales para la Recuperación de Suelos Contaminados con Cobre debido a Actividades Mineras” en la ciudad de México; con la finalidad de conocer las especies forestales con aptitud para la remoción de cobre del suelo. Se encontró que la especie forestal *Acacia saligna*, tiene un elevado potencial para la acumulación de cobre en sus órganos con valores de 34,8 ppm para hojas y 12,3 ppm en el tallo. Asimismo, el porcentaje de sobrevivencia fue superior al 80%.

Alaboudi, Ahmed, & Brodie (2018) desarrolló un estudio titulado “Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant” en la ciudad de Melbourne, Australia. El objetivo del estudio fue determinar el potencial de remoción de cadmio y plomo utilizando el girasol. Para ello, se contaminó el suelo con concentraciones de 200 mg/kg para ambos metales. La concentración del plomo y cadmio en los tallos fue respectivamente 40,1 y 65,7 mg/kg; mientras que para las raíces fue respectivamente 107,7 y 71,3 mg/kg.

Irfan et al. (2021) realizó una investigación denominada “Heavy metals immobilization and improvement in maize (*Zea mays* L.) growth amended with biochar and compost” en la ciudad de Peshawar, Pakistan. El propósito del estudio fue analizar el efecto comparativo del biocarbón y el compost sobre la inmovilización de Pb, Cd y Cr en el suelo. Se colocaron

diez kg de suelo en macetas y se enriquecieron con Pb, Cd y Cr en concentraciones de 20, 10 y 20 mg/kg. Se encontró que la mayor reducción de Pb, Cd y Cr extraíbles en el suelo fue de 79%, 61% y 78% con 4% de biocarbón.

Asimismo, Mahardika, Rinanti, & Fachrul (2018) desarrolló un estudio titulado "Phytoremediation of heavy metal copper (Cu^{2+}) by sunflower (*Helianthus annuus* L.)" en la ciudad de Jakarta, Indonesia. El objetivo del estudio fue evaluar el potencial de remoción de cobre por el girasol. Las plántulas de *H. annuus* de 12 semanas de edad se cultivaron en suelo contaminado con Cu^{2+} , con variaciones de tiempo de absorción de 3, 6 y 9 semanas. Se encontró que la especie en estudio la capacidad de de remover Cu^{2+} , y la remoción más alta de Cu^{2+} es 85.56%, el factor de bio-concentración /acumulación de metal (BCF) más alto es 0.99 ocurrido en las raíces con 9 semanas de tiempo de exposición y el factor de translocación (TF) más alto es 0.71.

Por otro lado, Greggi (2017) realizó una investigación denominada "Fitorremediação de solos contaminados por metais pesados" en la ciudad de Paraná, Brasil. El objetivo del estudio fue analizar la eficiencia de la especie *Jatropha curcas* L. Para la remoción de plomo del suelo. Para ello se contaminó el suelo como dosis de plomo de 72, 180 y 300 mg/kg. Se encontró una mayor concentración de plomo en la materia seca (15,75 mg/kg) para la dosis de 300 mg/kg.

1.1.2. Antecedentes Nacionales

Munive, Loli, Azabache, & Gamarra (2018) desarrollaron un estudio titulado "Fitorremediación con Maíz (*Zea mays* L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados", en la ciudad de Huancayo. Se empleó suelos agrícolas de las localidades de Mantaro y Muqui, los cuales superaron los ECAs de suelo del Perú. En dicha investigación se encontró que la planta de maíz acumuló mayores cantidades de plomo y cadmio en la raíz, indicando con ello que esta especie vegetal es excluyente de metales pesados, ya que su factor de translocación fue menor a 1.

Gonzales et al. (2018), desarrollaron una investigación titulada "Fitorremediación de un Suelo con Exceso de Cobre utilizando Cuatro Especies Vegetales; "Girasol", "Alfalfa", "Geranio" e "Higuerilla"" estudiaron 4 especies vegetales con potencial de remover de cobre el suelo, en la ciudad de Trujillo. Para ello se contaminó artificialmente el suelo con sulfato de cobre hasta 278 ppm. La especie que obtuvo mayor porcentaje de remoción de

cobre fue la alfalfa con un 72% de eficiencia; seguido del geranio con un 68% y la higuera con 67%.

Por otro lado, Papuico (2018) realizó un estudio denominado “Técnica de fitorremediación en la extracción de metales pesados con la planta Yaluzai (*Senecio rudbeckiaefolius*) en la relavera de Quiulacocha del distrito de Simón Bolívar de Rancas” en la ciudad de Pasco. El objetivo del estudio fue analizar la capacidad de la especie *senecio rudbeckiaefolius*, para la remoción de metales (Fe, Cu, Pb, Zn) del suelo. Se encontró que la especie vegetal en estudio, tiene el potencial de acumular metales pesados en los diferentes órganos de la planta, principalmente en las hojas y las raíces.

Asimismo, Torres (2018), desarrolló un estudio titulado “Evaluación de la concentración de metales pesados como As, Cu, Cd, Hg Y Pb en el botadero de Cancharani de la ciudad de Puno (Universidad nacional del altiplano)”, en la ciudad de Puno. El propósito del estudio fue evaluar la concentración de metales pesados en el botadero de Chancharani en Puno. Las concentraciones de cadmio, plomo, mercurio y cobre fueron respectivamente 2.10, 76.64, 0.48 y 134.37 mg/kg. Asimismo, se concluye que, a medida que se aleja del centroide, la concentración de los metales pesados disminuye.

De otro lado, Alva (2015) realizó una investigación denominada “Capacidad Bioacumuladora de Plomo, a diferentes Concentraciones, en Raíz, Tallo y Hoja en *Taraxacum Officinale* en Condiciones de Laboratorio”, en la ciudad de Trujillo, con la finalidad de evaluar la capacidad de absorción del plomo del suelo por la especie *Taraxacum officinale* (diente de león). Para lo cual se consideró los siguientes tratamientos 0,50, 100 150 mg/kg de plomo en muestras de suelo. Las evaluaciones de las variables dependientes se hicieron al cabo de 28 días. Se encontró que el órgano de la planta que acumula mayor cantidad de plomo es la raíz; sin embargo, para concentraciones mayores a 150 mg/kg, se manifiesta un efecto perjudicial sobre las raíces.

Recharte, Mejia, & Fajardo (2018), realizó un estudio titulado “Fitorremediación con *Ricinus communis* para el tratamiento de suelos contaminados con plomo” en la ciudad del Callao. El objetivo del estudio fue evaluar el potencial de descontaminación del suelo con la especie *Ricinus communis*. Para lo cual, se consideró cuatro concentraciones de plomo 458.62 mg/kg, 704.36 mg/kg, 955.94 mg/kg y 1210.32 mg/kg, con tres repeticiones cada una. Se encontró que la especie *Ricinus communis*, es una especie esclusora, ya que

su factor de translocación fue menor que 1. Asimismo, el plomo queda estabilizado en las raíces de la planta.

1.1.3. Antecedentes locales

Samamé & Osoreo (2020) desarrollaron un estudio titulado "Capacidad del *Gynerium sagittatum* para la fitorremediación de suelos de cultivos arroz con metales pesados bajo condiciones controladas, Moyobamba, 2020" en la ciudad de Moyobamba. El objetivo del estudio fue analizar el potencial de *G. sagittatum* para la remoción de metales pesados de suelos de cultivo de arroz. La muestra estuvo conformada por 82 kg de suelo proveniente de la localidad de Metoyacu. Se encontró una concentración de 1,51 mg/kg de cadmio y 27,21 mg/kg de cromo en el suelo de cultivo de arroz. Asimismo, la especie *G. sagittatum* presentó eficiencias de remoción de 32% y 35% respectivamente para cadmio y cromo.

Asimismo, Ríos & Saavedra (2019) realizaron una investigación denominada "Mejoramiento del suelo en cultivos de arroz a través del abonamiento con cascarilla de café (CC) y agua miel de cacao (MC), Tarapoto, 2019" en la ciudad de Tarapoto. El objetivo del estudio fue evaluar el potencial de la cascarilla de café y las aguas mieles del cacao para la descontaminación de suelos del cultivo de arroz. Para lo cual se consideró tres tratamientos (2 kg CC + 800 mL MC, 2 kg CC + 900 mL MC y 2 kg CC + 1000 mL MC). Se encontró como dosis óptima para la remoción de metales pesados al tratamiento 2 kg CC + 1000 mL MC.

Fernández (2018) desarrolló un estudio titulado "Biorremediación con *Penicillium* spp, *Phanerochaete* spp y *Trichoderma* spp de suelos contaminados con DDT. Moyobamba – 2016" en la ciudad de Moyobamba. El objetivo del estudio fue analizar el potencial de biorremediación de suelos contaminados con DDT mediante el uso de *Penicillium* spp, *Phanerochaete* spp y *Trichoderma* spp. Se encontró que la especie *Phanerochaete* redujo el 85% del plaguicida DDT después de 90 días de ensayo.

Lizana (2019) realizó una investigación denominada "Aplicación de carbón activado de cáscara de "coco" y cascarilla de "arroz" para la biorremediación de suelos contaminados por gasolina, distrito y provincia de Moyobamba - 2018", en la ciudad de Moyobamba. El objetivo del estudio fue estudiar la remoción de hidrocarburos de la gasolina mediante el uso de carbón activo y cascarilla de arroz. Para lo cual se contaminó el suelo a una concentración de 73 mg/kg de hidrocarburos totales del petróleo (TPH). Se encontró un

porcentaje de remoción de los hidrocarburos de la gasolina del 99.59% con la cáscara de coco.

Vásquez (2010) desarrolló un estudio titulado "Evaluación del índice de calidad del agua en el área de influencia del botadero municipal de Tarapoto sector Yacucatina San Martín – Perú" en la ciudad de Tarapoto. El objetivo del estudio fue analizar la calidad de las fuentes hídricas circundantes al botadero municipal de la ciudad de Tarapoto. Se encontró la presencia de cromo (0,415 mg/L) y níquel (0,217 mg/L) en los lixiviados del botadero; asimismo se encontró la presencia de coliformes totales, coliformes termotolerantes, DBO, DQO y nitratos en las fuentes hídricas.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Metales pesados (plomo, mercurio y cadmio)

Los metales pesados se caracterizan por su elevada densidad, generalmente superior a cinco veces la densidad del agua. Los metales pesados de mayor interés debido a su efecto perjudicial sobre la salud humana y el ambiente son el mercurio, el arsénico, el cadmio y el plomo. Asimismo, los metales pesados son resistentes a la degradación biológica y se bio-acumulan a medida que se avanza en la cadena alimentaria (Zapata, 2019). El cadmio (Cd) es un metal que se encuentra naturalmente en la corteza terrestre. Está presente en pequeñas cantidades en combustibles fósiles sólidos y biomasa. Es un metal tóxico, muy irritante para el sistema respiratorio, clasificado como cancerígeno y mutagénico. El polvo de cadmio presenta toxicidad crónica para el medio ambiente acuático, pero también toxicidad aguda. Por otro lado, el mercurio (Hg) es un elemento que se encuentra naturalmente en la corteza terrestre y en los combustibles minerales sólidos, petróleo y biomasa. Es un metal pesado, reconocible por su aspecto plateado brillante y el único presente en estado líquido en condiciones normales de temperatura y presión. En cambio, el plomo (Pb) es un elemento que se encuentra de forma natural en todos los ambientes, pero principalmente en la corteza terrestre y el suelo. También se encuentra en combustibles fósiles sólidos y biomasa (Cuniasse, 2020).

1.2.2. Contaminación del suelo por metales pesados

Es el proceso que ocurre por la inserción de materiales extraños en el componente edáfico hasta niveles inusuales, provocando un impacto nocivo sobre los seres vivos que tienen por hábitat el ecosistema edáfico. De otro lado, se denomina suelo contaminado cuando se

ha alterado negativamente las propiedades del mismo, por la introducción de elementos tóxicos para el ambiente y la salud humana (Torres, 2018). Asimismo, numerosos estudios indican que los metales pesados que han tendido un mayor incremento debido a las actividades humanas son el plomo, el mercurio y el cadmio. La concentración promedio de cadmio en el suelo es seis veces mayor que los valores de referencia de la Unión Europea; el plomo y el mercurio superan el valor de referencia en aproximadamente el doble. En cuanto al suelo, las fuentes más importantes de contaminación por metales pesados son: Depositiones atmosféricas debido al parque automotor y el uso de combustibles fósiles, los fertilizantes utilizados en las prácticas agrícolas, disposición inadecuada de residuos sólidos en los botaderos, el uso de carbón de la actividad industrial y la actividad extractiva y minera (Pietropaoli, 2014).

1.2.3. Absorción de metales por las plantas

Los metales pesados ingresan a la planta a través de las raíces, para luego ser conducidos a los diferentes órganos aéreos de la planta. La absorción de los metales pesados depende de las características de la especie vegetal y de la proporción disponible del metal pesado en el suelo (Torres, 2016).

La absorción de contaminantes por las raíces de las plantas se denomina fito-extracción, y luego se trasloca hacia las hojas de las plantas. Esta técnica puede ser utilizada para metales pesados como cadmio, plomo y níquel, pudiendo también ser utilizado para el selenio y otros compuestos orgánicos (Ribeiro, 2013).

La biodisponibilidad de metales en el suelo depende de varias condiciones entre ellas el pH, el potencial de óxido reducción y la oxigenación. Existen algunas formas de fosfato que posibilitan la absorción de metales por las raíces de las plantas. La acidificación de la rizósfera permite que algunas especies de plantas aumenten la capacidad de absorción de metales por las raíces. Por otro lado, la presencia de quelatos en el suelo también regula el proceso de Bio-disponibilidad de metales para la absorción de las plantas (Valente, 2008). La exposición de las plantas a niveles elevados de metales pesados induce alteraciones a nivel fisiológico, bioquímico y genético como para determinar un estado general de estrés, que se manifiesta con clorosis difusa y necrosis a nivel foliar y con reducción de la capacidad de crecimiento hasta la muerte de la planta. El estado de estrés que se genera a nivel metabólico se debe básicamente a la alteración de la nutrición mineral a nivel radicular y al aumento celular de especies reactivas de oxígeno (radicales libres) que, si no

es oportunamente contrarrestado por la actividad antioxidante natural, genera un estado de estrés oxidativo que puede alterar las principales funciones fisiológicas de la planta (Pietropaoli, 2014).

1.2.4. Fitorremediación

La fitorremediación es una técnica que utiliza plantas para recuperar suelos contaminados. Este método presenta ventajas debido a su naturaleza permanente, bajos costos de mantenimiento, protección contra la erosión eólica e hídrica y una mayor estructuración de los suelos (Da Silva, Hansted, Tonello, & Goveia, 2019).

Asimismo, es una técnica ambientalmente sostenible, la cual utiliza especies vegetales con la finalidad de remover los contaminantes del suelo; entre estos contaminantes se tienen plaguicidas, hidrocarburos, y nutrientes. El proceso de fitorremediación se desarrolla en la rizósfera; donde participan las raíces, hongos y bacterias (ver anexo B) (Torres, 2016).

1.2.4.1. Mecanismos de la fitorremediación

Existen cinco mecanismos a través de los cuales se desarrolla la fitorremediación de suelos. La fito-estabilización consiste en la inmovilización de un contaminante a través de las reacciones de absorción y acumulación en la zona de las raíces. Mientras que, la fito-volatilización consiste en la incorporación de contaminantes a los tejidos de la planta para luego liberarlos en forma gaseosa. Por otro lado, es el proceso que consiste en romper las moléculas de los contaminantes en productos menos tóxicos. Asimismo, en la fito-extracción la planta absorbe el contaminante del suelo y lo almacena en sus raíces, hojas y tallo; facilitando posteriormente su eliminación. Finalmente, en la fito-estimulación una cooperación entre las raíces y los microorganismos para degradar los contaminantes (Da Silva et al., 2019). A continuación, se describen los mecanismos de la fitorremediación (Amado & Chaves, 2015).

a. Fito-estabilización

En esta técnica, las plantas estabilizan los contaminantes en el suelo, previniendo pérdidas por erosión o lixiviación. La estabilización, por su parte, limita la migración de contaminantes al suelo. De hecho, se crea una barrera vegetal natural que proporciona resistencia a la erosión o incluso a la lixiviación. Esto puede prevenir el movimiento de contaminantes a los medios circundantes o limitar sus interacciones con la flora microbiana del suelo. Además, las raíces de las plantas pueden alterar las

condiciones ambientales, como el pH y la humedad del suelo. Así, eligiendo plantas adecuadas, es posible mantener ciertos contaminantes en el suelo, incluidos los metales, que son los principales objetivos de este mecanismo y, por lo tanto, evitan su movimiento a otros sitios (Tchang, 2018).

b. Fito-volatilización

En esta técnica, las plantas absorben o incorporan contaminantes en su tejido, para posteriormente ser liberados bajo la forma gaseosa. La fito-volatilización ocurre cuando una sustancia, una vez capturada en el suelo por la planta, es liberada en forma modificada o gaseosa a la atmósfera a través de la transpiración. Los compuestos emitidos al aire se consideran menos tóxicos para el medio ambiente. La actividad microbiana facilita la volatilización que puede ocurrir tanto en las hojas como en las raíces. Los compuestos orgánicos e inorgánicos que tienen una forma volátil pueden estar involucrados en la fito-volatilización. Este es particularmente el caso de ciertas sales o compuestos de mercurio, arsénico o selenio. Otros mecanismos como la rizo-degradación o la foto-degradación también pueden estar implicados en la volatilización del contaminante, ya que modifican la sustancia inicial. Este último luego entra en el proceso de translocación de la vía de la transpiración y se devuelve al aire (Vasconcellos, Pagliuso, & Sotomaior, 2012).

c. Fito-degradación

Este mecanismo se presenta cuando las plantas degradan contaminantes orgánicos con sus propias actividades enzimáticas, transformándolos en compuestos inorgánicos (CO, HO, Cl) o degradándolos a compuestos intermediarios estables que serán almacenados en el propio tejido vegetal. La fito-degradación ocurre cuando las plantas absorben, metabolizan y degradan un contaminante del suelo. La actividad enzimática, que se produce, entre otras cosas, por la deshalogenasa o la oxigenasa tiene lugar dentro de las células vegetales. Esto da como resultado la transformación o degradación parcial o total del contaminante en un compuesto menos dañino para el medio ambiente. La funcionalidad de la fito-degradación se basa en la capacidad de la planta para absorber el contaminante del suelo. Muchos contaminantes se pueden descomponer de esta manera, incluidos los herbicidas o los insecticidas. Sin embargo, solo los compuestos orgánicos pueden degradarse mediante la fitorremediación, ya que los compuestos inorgánicos solo pueden estabilizarse o almacenarse. Por lo general, los compuestos hidríficos se degradan con éxito mediante este mecanismo (Greipsson, 2011).

d. Fito-extracción

Es una técnica mediante la cual, las plantas extraen contaminantes del suelo y los acumulan en niveles hasta cien veces mayores que otras especies creciendo bajo las mismas condiciones. Durante la fito-extracción, las plantas toman los contaminantes de las raíces y los trasladan a las partes aéreas. El contaminante debe disolverse en el agua del suelo y entrar en contacto con las raíces para ser absorbido por la planta. Aunque hoy en día varios tipos de contaminantes son objeto de este mecanismo, originalmente la fito-extracción solo se usaba para eliminar metales pesados, incluidos el plomo, el níquel o el cobre. El proceso permite concentrar el contaminante en las plantas a través de la lignificación. El contaminante se acumula en el tejido vegetal porque no se descompone rápida o completamente. Esto facilita su posterior disposición y luego se puede realizar una recolección para retirar las plantas utilizadas del sitio de descontaminación. Estos pueden ser destruidos o utilizados para otros fines (Pequeno, Silva, & Nascimento, 2014).

e. Fito-estimulación

Mediante esta técnica, las plantas que degradan contaminantes orgánicos por medio de microorganismos de la rizósfera. La rizodegradación, también llamada fitoestimulación se produce en la zona de la rizósfera. Este proceso es útil para descomponer compuestos orgánicos hidrofóbicos que la planta no puede absorber. El contaminante en realidad se descompone con la ayuda de la combinación microbiana y fúngica que se encuentra en el suelo. A medida que las sustancias orgánicas se descomponen, se pueden producir compuestos similares o, a través de la mineralización, se pueden generar compuestos inorgánicos como el dióxido de carbono o el agua. Además, la penetración de las raíces en el suelo aumenta la aireación de la zona, lo que estimula la degradación aeróbica. Las plantas también pueden modular el entorno químico de la rizósfera, entre otras cosas, mediante la secreción de exudados como azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, ácidos grasos, esteroides, factores de crecimiento, nucleótidos, enzimas, etc. Estos son beneficiosos para los microorganismos porque estimulan su crecimiento. Con la secreción de exudados, las condiciones ambientales se vuelven óptimas y conducen a la degradación de los contaminantes. Finalmente, otra forma de estimular el crecimiento poblacional de la microbiota es manipular el pH y los nutrientes directamente en el suelo (Greipsson, 2011).

1.2.5. Fitorremediación de metales pesados

La vida útil de los metales en el suelo puede ser de miles de años, por lo que se necesitan nuevos enfoques tecnológicos para eliminar el exceso de metales tóxicos del medio ambiente. La remediación de suelos contaminados con metales pesados es una de las tareas más difíciles para la ingeniería ambiental. Las técnicas utilizadas actualmente son principalmente la descontaminación in situ mediante métodos de extracción físico-químicos, que son muy costosos. Además, destruyen la estructura del suelo y lo dejan biológicamente inactivo. Los métodos actualmente disponibles no son satisfactorios para la descontaminación de grandes áreas para la agricultura. Por lo tanto, se necesitan técnicas de alto rendimiento para la descontaminación de suelos de gran superficie, que están moderadamente contaminados y donde la fertilidad del suelo puede verse gravemente afectada (Lone, He, Stoffella, & Yang, 2008).

Los metales pesados más mencionados son el cadmio (Cd), el cobalto (Co), el cromo (Cr), el cobre (Cu), el manganeso (Mn), el molibdeno (Mo), el níquel (Ni), el plomo (Pb), el zinc (Zn).). Estos contaminantes no pueden degradarse en el medio ambiente, a diferencia de las moléculas orgánicas. El nivel tóxico de exposición de las plantas a los metales pesados activa una amplia gama de cambios fisiológicos y metabólicos. La respuesta tóxica fluctúa entre diferentes metales pesados debido a que tiene diferentes lugares de acción en las plantas. La disminución del crecimiento de las plantas, así como la necrosis de las hojas, la disminución de la tasa de germinación de las semillas y la pérdida del aparato fotosintético son las pruebas visuales más comunes del estrés creado por los metales pesados. La existencia de metales pesados induce cambios estructurales, bioquímicos y moleculares en los tejidos y células vegetales. Además, los metales pesados interfieren en la absorción, transporte, transpiración, metabolismo de los nutrientes e influyen en la absorción de metales esenciales. Estudios previos han demostrado que la presencia de Pb influye mucho en la absorción de nutrientes por parte de las plantas (Dubey, Shri, Gupta, Rani, & Chakrabarty, 2018).

La fitorremediación de metales pesados en suelos utiliza especies vegetales que son capaces de absorber y acumular contaminantes en los tejidos vegetales, no solo en las raíces, sino especialmente en la parte aérea o en los brotes. Para mejorar el proceso de remediación, es importante utilizar especies vegetales que puedan acumular altas concentraciones de metales pesados con efectos menores en su crecimiento y desarrollo. En general, las plantas hiperacumuladoras son especies de plantas que acumulan

concentraciones de metales pesados en los brotes, a tasas 100 veces mayores que las plantas no hiperacumuladoras, sin un efecto negativo significativo en su crecimiento y desarrollo. En la literatura existen tres definiciones de especies hiperacumuladoras, las cuales se basan en la capacidad de acumulación, el factor de bio-acumulación y el factor de translocación de los metales vegetales (Chirakkara, Cameselle, & Reddy, 2016).

1.2.6. Biodisponibilidad de metales pesados en el suelo

La composición química y las propiedades de sorción del suelo influyen en la movilidad y biodisponibilidad de los metales. La biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo es un factor crítico que afecta la eficiencia de la fito-extracción de los metales pesados objetivo. La baja biodisponibilidad es un factor limitante importante para la fito-extracción de contaminantes como el Pb. En general, solo una fracción del metal en el suelo está biodisponible para la absorción por las plantas. En cuanto a la biodisponibilidad de metales pesados/metaloides en el suelo, puede haber tres categorías: fácilmente biodisponibles (Cd, Ni, Zn, As, Se, Cu); moderadamente biodisponible (Co, Mn, Fe) y ligeramente biodisponible (Pb, Cr, U). Sin embargo, las plantas han desarrollado ciertos mecanismos para solubilizar metales pesados en el suelo. Las raíces de las plantas secretan sustancias que movilizan metales hacia la rizósfera, llamadas fitosideróforos. La secreción de iones H^+ a través de las raíces puede acidificar la rizósfera y aumentar la disolución de los metales. Los iones H^+ pueden reemplazar a los cationes de metales pesados adsorbidos del suelo. Los exudados de raíces generalmente pueden reducir el pH del suelo de la rizósfera en una o dos unidades en comparación con el suelo suelto. El bajo pH del suelo aumenta la concentración de metales pesados en la solución al promover la desorción (Ali, Khan, & Sajad, 2013).

1.2.7. Factores que afectan la fitorremediación de metales pesados

La absorción de metales pesados por parte de las plantas depende de varios factores. El pH del suelo, la textura, la capacidad de intercambio catiónico, la temperatura, los exudados de las raíces y el contenido de nutrientes también influyen en las propiedades y la biodisponibilidad de los metales tóxicos para las plantas. El factor de absorción radicular también se ve afectado por la actividad rizo-biológica, el exudado radicular, la temperatura, la humedad, el pH, la concentración de iones competidores y la concentración de metales en la solución del suelo. Varios otros factores, como la competencia catiónica,

la actividad microbiana y la temperatura, pueden influir en la biodisponibilidad de los metales, pero parecen jugar un papel menor, especialmente en comparación con los efectos del pH y algunos de los principales componentes del suelo (Yadav et al., 2018).

a. pH

El factor más importante que afecta la disponibilidad de oligoelementos es el pH del suelo. Para las especies catiónicas, los valores bajos de pH conducen a una mayor movilidad y, por lo tanto, a una mayor disponibilidad, mientras que ocurre lo contrario con las especies aniónicas. Esta tendencia se ha encontrado en una variedad de estudios, incluidas las pruebas de sorción, que sugieren que la adsorción de metales pesados aumenta con el aumento del pH del suelo. Hay una doble explicación para esto: (a) a medida que aumenta el pH, aumenta la hidrólisis de metales, lo que a su vez aumenta la sorción de metales; y b); aumentando así la capacidad de retención del suelo para especies catiónicas y disminuyendo para aniones (Antoniadis et al., 2017).

b. Contenido de arcilla

La capacidad de intercambio de cationes es una medida de la capacidad del suelo o sedimento para adsorber cationes en una forma en la que estos cationes puedan ser fácilmente desorbidos por sus iones competidores. El intercambio catiónico es causado por arcilla coloidal cargada negativamente y partículas de humus de la matriz del suelo. Para garantizar la neutralidad eléctrica del conjunto, las partículas del suelo adsorben iones cargados positivamente (Song et al., 2017).

c. Materia orgánica

La movilización de metales pesados en el suelo aumenta con el aumento de materia orgánica y promueve la formación de quelatos, aumenta la disponibilidad de nutrientes junto con una mejor capacidad de intercambio catiónico que aumenta la disponibilidad de metales en las plantas (Sheoran, Sheoran, & Poonia, 2016).

1.2.8. Absorción y transferencia de los metales en la planta

Hay una serie de procesos involucrados en la acumulación de metales pesados en las plantas, incluida la movilización de los mismos, absorción de las raíces, carga de xilema, transporte de raíz a tallo, compartimentación celular y secuestro. Los metales pesados existen principalmente en forma insoluble en el suelo, que no están biodisponibles para las plantas. Las plantas pueden aumentar su biodisponibilidad al liberar una variedad de exudados en las raíces, que pueden cambiar el pH de la rizósfera y aumentar la solubilidad

de los metales pesados. El metal biodisponible se absorbe en la superficie de la raíz y se mueve a través de la membrana celular hacia las células de la raíz. La captación de metales pesados en las raíces se produce principalmente a través de dos vías, vía apoplástica (difusión pasiva) y vía simplástica (transporte activo contra gradientes de potencial electroquímico y concentración a través de la membrana plasmática). La captación común de metales pesados a través de la vía simplástica es un proceso dependiente de la energía mediado por transportadores de iones metálicos o agentes complejantes (ver anexo C) (Dalvi & Bhalerao, 2013).

1.2.9. Uso de plantas para descontaminar suelos por metales pesados

La fitorremediación utiliza especies vegetales para la remoción de contaminantes. Estos organismos se adaptan a ambientes extremadamente diversos, de forma que muchas especies poseen la capacidad de interactuar simbióticamente con otros organismos. Esta interacción es determinante para la adaptación en ambientes como suelos salinos, pobres y ricos en nutrientes o excesivamente contaminados con metales (Da Silva et al., 2019).

Asimismo, entre las especies más eficientes que se utilizan para la remediación de suelos contaminados por metales pesados están el maíz (*Zea mays*), el girasol (*Helianthus annuus*) y el tabaco (*Nicotiana tabacum*) (Yan et al., 2020). Además, estos autores enfatizan el potencial de la especie *M. sativa* para remover plomo del suelo.

a. *Medicago sativa* (Alfalfa)

Es una planta herbácea de menos de un metro de longitud, con sistema radicular definido. El cultivo se adapta a climas cálidos y templados y se desarrolla adecuadamente entre los 1500 y 2500 msnm (Pombosa, 2016). Asimismo, es la leguminosa más utilizada en el mundo, debido a su potencial y adaptabilidad diferentes condiciones, como la humedad del suelo, temperatura y manejo. Pertenece a la familia *Fabaceae*, oriunda de la región del Cáucaso en los actuales países de Turquía e Irán. Se cultiva para la producción de heno, ensilaje, forrajes frescos y pellets (Hoppen, 2021).

b. *Taraxacum officinale* (Diente de león)

Pertenece a la familia *Asteraceae*, y posee distribución amplia en el hemisferio sur, y en zonas calientes del hemisferio norte. Es una planta arvense perenne que puede crecer hasta 50 cm de altura. La raíz es pivotante, profunda y gruesa con el exterior marrón y el interior blanco lechoso. El tallo es de color rojizo, liso y hueco con una roseta de hojas que irradian de su base. Las hojas pueden tener el borde casi liso y dentado (Pinto

& Ferreira, 2018). Kajka & Rutkowska (2018) menciona que, la especie *T. officinale* acumular se caracteriza por acumular grandes cantidades de metales pesados (plomo y cadmio) en las partes aéreas comparada a su acumulación en las raíces; asimismo a mayor concentración de metales en el suelo, la planta translocará mayores cantidades de estos metales a la parte aérea.

1.3. Definición de términos básicos

- Botadero: Son puntos de disposición inadecuada de los residuos sólidos en vías públicas, áreas urbanas o rurales; los cuales generan riesgos a la salud pública y ambientales (DIGESA, 2004).
- Cadmio: Es un elemento químico de número atómico 48, de color blanco azulado, es uno de los metales pesados más tóxicos y se utiliza en la fabricación de pilas.
- Calidad del suelo: Es la capacidad de un suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, para sustentar la productividad de plantas y animales, mantener o aumentar la calidad del aire y del agua, y promover la salud de las plantas, los animales y las personas (Kazmierczak, 2018).
- Fito-estabilización: Este mecanismo tiene como objetivo evitar la movilización del contaminante y limitar su distribución en el suelo, a través de una cubierta vegetal. Así, las plantas actúan aumentando la absorción del contaminante; modificando el flujo de agua en el suelo; incorporando contaminantes residuales libres en las raíces; y previniendo la erosión por la acción del viento y la lluvia.
- Fito-extracción: En este mecanismo, las raíces absorben y almacenan los contaminantes o los transportan y acumulan en las partes aéreas. También se conoce como fito-acumulación. Utiliza plantas que acumulan contaminantes para eliminar metales u orgánicos del suelo.
- Fitorremediación: Es una técnica ambientalmente sostenible, que se basa en el uso de especies vegetales para la remoción de metales pesados, plaguicidas u otros compuestos orgánicos como los hidrocarburos.
- Mercurio: Es un elemento químico de número atómico 80, se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente; se utiliza en la fabricación de lámparas fluorescentes, termómetros y amalgamas odontológicas. La exposición al mercurio puede provocar alteraciones cognitivas.

- Metales pesados: Son un grupo de elementos químicos, sólidos en su estado puro, con excepción del mercurio que es líquido. Estos elementos se caracterizan por su brillo, dureza, buena conductividad eléctrica y térmica, ductibilidad y por sus elevados puntos de fusión y ebullición. Por otro lado, los metales pesados se caracterizan por presentar densidades elevadas superiores a 4 g/cm^3 (Ribeiro, 2013).
- pH: Es una escala logarítmica decimal, que se utiliza para determinar la acidez o alcalinidad de una solución. Siendo ácidas las soluciones que tienen un pH menor a 7 y alcalinas las que tienen un pH mayor a este valor; mientras que, un valor de pH igual a 7, corresponde a soluciones neutras (Vázquez & Rojas, 2016).
- Plomo: Elemento químico con número atómico 82, es un metal pesado con gravedad específica 11,4. El plomo puede causar diversos efectos, entre ellos, aumento de la presión sanguínea, daño renal, afectación al sistema nervioso central y reducción de las habilidades del aprendizaje.
- Relleno sanitario: Es una técnica segura para la disposición final de los residuos sólidos; de tal manera que se reduzca el impacto al ambiente. Se basa en los principios de ingeniería como áreas mínimas, compactación de residuos, control de lixiviados y gases.

CAPÍTULO II

MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Tipo y nivel de investigación

2.1.1. Tipo de investigación

Teniendo en cuenta lo establecido por Hernández et al. (2014), la presente investigación, según el propósito o finalidad que persigue, corresponde al tipo de investigación aplicada porque tiene la finalidad de resolver problemas prácticos inmediatos en orden a transformar las condiciones. El tipo de investigación es aplicada, ya que permitió conocer el efecto que tienen las especies fitorremediadoras para eliminar metales pesados del suelo.

2.1.2. Nivel de investigación

Según Supo (2015) la presente investigación pertenece a un nivel experimental, ya que busca conocer el efecto que tienen las especies vegetales en la remoción de metales pesados del suelo, mediante la aplicación de dos tratamientos (especies fitorremediadoras) y tres repeticiones.

2.1.3. Diseño de investigación

Hernández et al. (2014) indican que, en los diseños experimentales se manipula la variable independiente. Considerando lo anteriormente citado, en la presente investigación se seleccionó un diseño experimental, con dos tratamientos: especies fitorremediadoras (ver tabla 1).

Tabla 1

Descripción del diseño experimental

Tratamiento	Descripción	Réplica		
		1	2	3
T0	Suelo del botadero	T0R1	T0R2	T0R3
T1	<i>M. sativa</i>	T1R1	T1R2	T1R3
T2	<i>T. officinale</i>	T2R1	T2R2	T2R3

Fuente: Elaboración propia.

Es así que, en la presente investigación se obtuvo el efecto fito-remediador sobre el suelo del botadero Yacucatina contaminado por metales pesados (Pb, Hg y Cd)

utilizando las especies *Medicago sativa* (Alfalfa) y *Taraxacum officinale* (Diente de león). La medición de la concentración de metales pesados se determinó a los 90 días después del establecimiento de las plantas en las macetas.

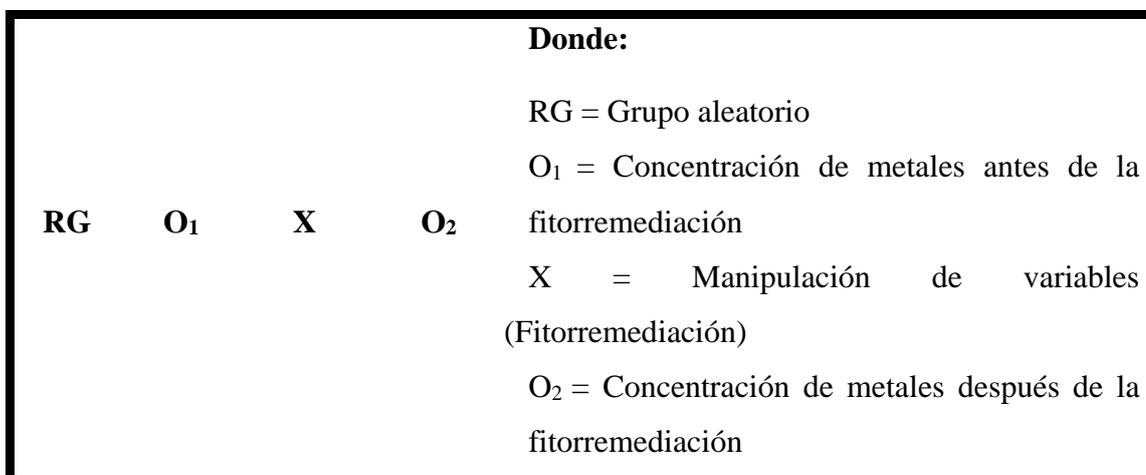


Figura 1. Esquema del diseño de investigación experimental. (Fuente: Hernández et al. 2014)

2.2. Población y muestra

Población

La población de estudio estuvo conformada por el área del botadero Yacucatina, con una superficie de 15 hectáreas. Para lo cual se realizó una visita al botadero, anotando las coordenadas UTM, zona 18 S, son 355822 (E) y 9264132 (N).

Muestra

La muestra estuvo constituida por una cantidad de suelo contaminado del botadero Yacucatina – distrito de Juan Guerra; que se utilizó para el ensayo. Las muestras fueron obtenidas siguiendo el procedimiento de la guía para muestreo de suelos del Decreto Supremo N° 002-2013 MINAM, estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica que se utilizó para el desarrollo del estudio fue la observación; la cual consiste en el uso sistemático de los sentidos para analizar un fenómeno. Asimismo, se utilizó como instrumentos de recolección de datos un GPS-Garmin Montana 650 y una wincha para la medición de las dimensiones de las cajas de madera.

2.4. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para el análisis de datos se utilizó la prueba T para muestras independientes, con la finalidad de evaluar el efecto de las especies fito-remediadoras en la remoción de metales

pesados del suelo del botadero de Yacucatina. Asimismo, se consideró un 95% de confianza para la prueba de hipótesis. Por otro lado, el análisis de datos se realizó en el paquete estadístico SPSS 24. También se utilizó procedimientos de estadística descriptiva como media y desviación estándar, para analizar las variables dependientes.

2.5. Materiales y Métodos

2.5.1. Materiales, equipos y reactivos

En la Tabla 2 se muestran los materiales, equipos y reactivos que se utilizó para el desarrollo del estudio.

Tabla 2

Materiales, equipos y reactivos

Materiales	Equipos	Reactivos
Tijera	Espectrofotómetro	Agua destilada
Cuaderno de apuntes	Balanza analítica	Ácido Nítrico QP al 65%
Lapiceros	Bloque digestor de 48 posiciones	Ácido clorhídrico QP al 37%
Formatos de laboratorio		Peróxido (30%)
Mandil		
Micro-pipetas automáticas de 20 μ L		
Pipetas automáticas de 100 μ L		
Pipetas automáticas de 10 ml		
Pipetas automáticas de 5 ml		
Matraz aforado de 25 ml		
Matraz aforado de 50 ml		
Matraz aforado de 1000 ml		
Matraz aforado de 500 ml		
Vasos de precipitado de 100 ml		
Vasos precipitados de 25 ml		
Papel filtro Whatman N° 40		
Espátulas		
Frascos agitadores de 30 ml		
Digitube de 50 ml		

Fuente: Elaboración propia

2.5.2. Métodos

La presente investigación se desarrolló en cuatro etapas, las mismas que se describen a continuación:

a. Primera etapa: etapa de gabinete inicial

- Revisión bibliográfica

Se consultó en revistas indexadas, tesis de repositorios nacionales e internacionales, libros y otros que permitan obtener información confiable para la

ejecución del presente estudio.

- **Coordinación para la obtención de equipos y materiales**

Se desarrolló las gestiones correspondientes, para acceder al laboratorio de Servicios Analíticos generales (SAG) – Lima. Asimismo, se solicitó el permiso respectivo para la adquisición de equipos y materiales del laboratorio Servicios Analíticos generales (SAG) – Lima.

- **Elaboración de los instrumentos**

En esta fase se procedió a la elaboración de formatos de campo y llenado de cadena de custodia para la recolección de los datos de la presente investigación. También se elaboró mapas, lista de chequeo y otros instrumentos necesarios para desarrollar la investigación.

b. Segunda etapa: etapa de campo

- **Obtención del Suelo contaminado (Testigo)**

En cada punto del botadero de Yacucatina se eliminó la cobertura vegetal y se limpió la superficie del suelo descartando todo lo que sea rastrojo o restos; luego con una pala se efectuó los cortes hasta una profundidad de 15 a 20 cm. Enseguida se extrajo una primera palada (haciendo un hoyo en forma de V) arrojándola al costado, y luego una segunda palada de 3 cm de grosor aproximado. Posteriormente se colocó la muestra de suelo en un costal. Luego, se colectó el material de las submuestras desmenuzando los terrones hasta un tamaño de aproximadamente 1 cm y se procedió a mezclar homogéneamente. Finalmente, se utilizó un cernidor y se puso en una bolsa Ziploc #10.

El botadero tiene un área de 15 ha, por ello, el número de puntos de muestreo a considerar, de acuerdo a la guía de muestreo de suelos del MINAM (2014) se calcula con la siguiente ecuación:

$$NPM = 18 + 2.34 * A$$

NPM: Número de puntos de muestreo

A: Área en hectáreas

Al reemplazar en la ecuación, se obtiene 53 puntos de muestreo, de los cuales se extrajo 1 kg de suelo por punto. Las muestras se obtuvieron cada 25 m lineales conforme a la guía de muestreo de suelos citada. Posteriormente se homogenizó hasta obtener una mezcla uniforme. Asimismo, se consideró tres cajas (tres réplicas) para la especie *Taraxacum officinale* (Diente de León), tres cajas para la

especie *Medicago sativa* (Alfalfa) y 3 cajas para el testigo (control); a cada una de estas cajas se agregó 5 kg de suelo homogenizado del botadero. Los parámetros que se analizaron en las muestras de suelo fueron los metales pesados (Plomo, Cadmio y Mercurio).

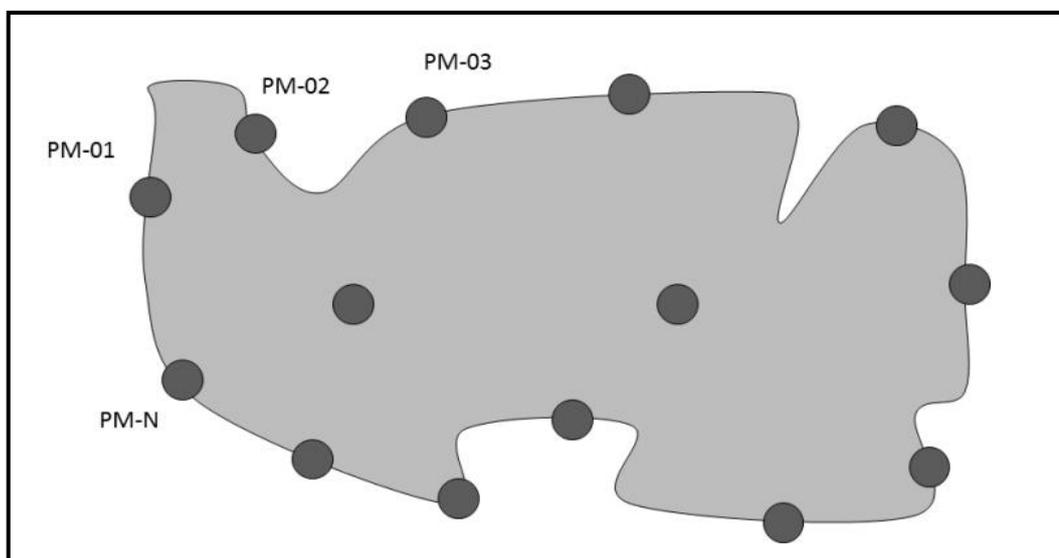


Figura 2. Puntos de muestreo de área contaminada. (Fuente: MINAM 2014).

- **Obtención de la especie Alfalfa (*Medicago sativa*)**

En primer lugar, se realizó una visita de campo al lugar endémico de la Alfalfa americana en la región San Martín, ubicado en distrito de (Nuevo Celendín – distrito de Zapatero), con el propósito de identificar el espécimen, el cual constituye el material biológico para desarrollar el proyecto. Consecutivamente en una segunda visita de campo se procedió a la siembra de la alfalfa por “Voleo” esparciendo las semillas uniformemente por la superficie en la caja de madera. Posteriormente, se agregó el agua y un poco de suelo del botadero hasta cubrir las semillas.

- **Obtención de la especie Diente de León (*Taraxacum officinale*)**

Se realizó una primera visita de campo a lugares endémicos del diente de león en la región San Martín, a fin de identificar los especímenes, ubicado en la ciudad de (Lamas – provincia de Lamas y Sisa – provincia de El Dorado) de los cuales se obtuvo el material biológico para desarrollar la investigación. En una segunda visita de campo se procedió a la cosecha de semillas del diente de león de los lugares endémicos, para ser trasplantado en la caja de madera. Después de ocho días de germinación se procedió al repique.

- **Establecimiento de las plántulas de alfalfa y diente de león**

Para el desarrollo del estudio se han requerido tres cajas con nueve plántulas cada una, haciendo un total 27 individuos de cada especie vegetal. Se trasladó las muestras de suelo proveniente del botadero de Yacuatina hasta el área experimental. Luego se estableció las plántulas en el suelo del botadero. Después de un periodo de tres meses que duró el ensayo, se extrajo una muestra 500 g por unidad experimental, la cual se envió al laboratorio para analizar la concentración de mercurio, plomo y cadmio.

- **Descripción de las unidades experimentales**

Cada unidad experimental estuvo conformada por una caja de madera con dimensiones largo 30 cm, ancho 30 cm y altura 20 cm. Asimismo, en la base de las cajas se realizó pequeños agujeros con la finalidad de evitar que el agua se acumule al momento de irrigar el suelo. Se estableció nueve plántulas en cada una de las cajas.



Figura 3. Medida de la caja de madera. (Fuente: Elaboración propia)

Por otro lado, la disposición de las unidades experimentales en el campo experimental se detalla en la figura 4. La distancia entre unidades experimentales fue 10 cm, mientras que la separación entre cada unidad experimental y el extremo del campo experimental fue 5 cm; obteniéndose un área de 1.44 m² (1.2 m x 1.2 m).

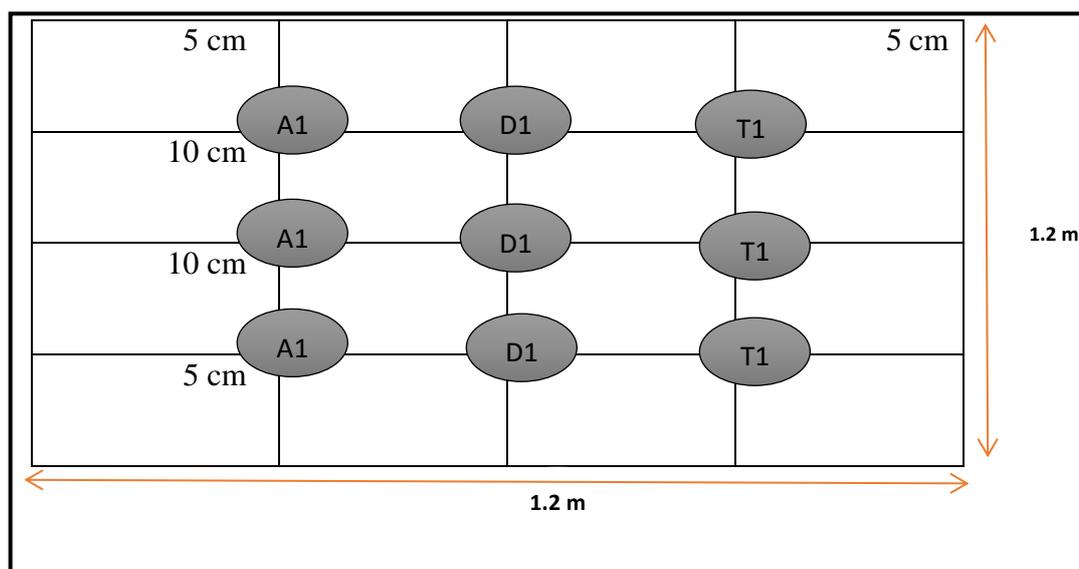


Figura 4. Disposición de las plantas de cada especie en las cajas. (Fuente: Elaboración propia)

c. Tercera etapa: etapa de laboratorio

Se pesó 500 g de suelo, luego se homogeneizó manualmente. Posteriormente la muestra se coloca en la estufa a 100°C por 24 horas; luego se extrae 5 g y coloca en una placa Petri con su respectiva codificación. Posteriormente se tamiza la muestra con una malla Tyler N° 32; luego se coloca la parte fina en una bolsa plástica, con su respectivo código. Posteriormente se coloca 0,05 g de muestra en cada uno de los cinco digitubos (blanco, muestra control, muestra, duplicado y muestra adición). A continuación, las muestras pasan a la campana de extracción a una temperatura inferior a 93°C. Luego se agrega una solución de ácido nítrico, HNO₃ en la proporción volumétrica 1:1 (agua ultra pura, 5 mL: ácido nítrico, 5 mL). Después se deja enfriar, luego se añade 2.5 mL de la misma solución anterior y se vuelve a calentar por 30 minutos.

Enseguida, se agrega peróxido de hidrógeno al 30% (1 mL de agua pura y 1.5 mL de peróxido). Posteriormente, se añade 0.5 mL de peróxido de hidrógeno; llevándose luego a ebullición por 2 horas y se deja enfriar por 20 minutos.

Luego, se agrega 5 mL de ácido clorhídrico a cada uno de los digitubos y se coloca nuevamente en la campana de extracción por 15 minutos y se deja enfriar. Para finalizar se agrega agua pura hasta completar un volumen de 50 mL y se procede a taparlos. Posteriormente, se homogeniza las muestras mediante agitación y se coloca nuevamente en la campana de extracción. Luego, se extrae los digitubos y

se colocan en una rejilla para ser filtrados mediante papel de filtro Whatman. Posteriormente se coloca en un equipo refrigerante (auto-sampler) a una temperatura de 10000°C y se pasa al equipo de lectura mediante software (ICP-óptico), con lo cual se obtiene las concentraciones de los metales pesados.

Cuarta etapa: gabinete final

En esta etapa se desarrolla el procesamiento de los datos obtenidos en campo y la presentación de los resultados en el informe.

- Procesamiento de datos

Se recolectó las mediciones de la concentración de metales pesados (Hg, Pb y Cd) del suelo y se analizó en el programa SPSS 24, para lo cual se utilizó el procedimiento estadístico denominado prueba T para dos muestras independientes. Asimismo, para la presentación de resultados se elaboraron figuras y tablas, con la finalidad de presentar adecuadamente la información.

- Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos se interpretaron, considerando la hipótesis inicial y los antecedentes relacionados a la línea de investigación.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

A continuación, se muestran los resultados de la presente investigación, la cual tiene el propósito de evaluar la eficiencia de remoción de metales pesados del suelo del botadero Yacucatina, mediante la técnica de fitorremediación de las especies *M. sativa* y *T. officinale*. Para ello, en primer lugar, se determinó la concentración de metales pesados (plomo, mercurio y cadmio) que presenta el suelo del botadero.

3.1.1 Concentración de metales pesados del suelo del botadero

La tabla 3 muestra la concentración de metales pesados del suelo del botadero. Se encontró una concentración promedio de plomo de 9,41 mg/kg en el suelo del botadero, este valor, no sobrepasa el Estándar de calidad ambiental de suelo para este metal (70 mg/kg). Por otro lado, concerniente a la concentración de mercurio, no se pudo determinar valores puntuales, debido a que estuvieron por debajo de los límites de detección del método (<0,1 mg/kg). Mientras que, para el cadmio, se encontró una concentración promedio de 5,60 mg/kg, sobrepasando el Estándar de calidad ambiental de 1,4 mg/kg. Estos valores, nos indican la necesidad de utilizar alternativas de descontaminación del suelo, como la técnica de fitorremediación, la cual fue utilizada en el presente estudio.

Tabla 3

Concentración de metales pesados del suelo del botadero

Réplica	Plomo (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)
1	9,55	<0,1	5,59
2	9,52	<0,1	5,59
3	9,15	<0,1	5,62
Media	9,41	<0,1	5,60
Desviación estándar	0,22	-	0,02
ECA (mg/kg)	70	6,6	1,4

Fuente: D.S N° 011-2017-MINAM. - Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo

3.1.2 Concentración de metales pesados después de la aplicación de la técnica de fitorremediación

En este apartado, se analizó la concentración de metales pesados que presentó el suelo, luego del establecimiento de las especies fitorremediadoras *M. sativa* y *T. officinale*.

3.1.2.1 Concentración de plomo con las especies *M. sativa* y *T. officinale*

La tabla 4 muestra la concentración de plomo del suelo, luego del establecimiento de las especies *M. sativa* y *T. officinale*. Con la especie *M. sativa*, se encontró una concentración promedio de plomo en el suelo del botadero de 8,50 mg/kg, mientras que con la especie *T. officinale*, la concentración de plomo fue 7,39 mg/kg; ambos valores no sobrepasan el Estándar de calidad ambiental de suelo para este metal (70 mg/kg). Asimismo, la especie que retuvo la mayor cantidad de plomo fue *T. officinale*.

Tabla 4

Comparación de la concentración de plomo (mg/kg) entre las dos especies

Réplica	<i>M. sativa</i>	<i>T. officinale</i>
1	8,48	8,16
2	8,83	7,92
3	8,18	6,10
Media	8,50	7,39
Desviación estándar	0,33	1,13
ECA (mg/kg)	70	

Fuente: D.S N° 011-2017-MINAM. - Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo

3.1.2.2 Concentración de mercurio con las especies *M. sativa* y *T. officinale*

La tabla 5 muestra la concentración de mercurio del suelo, luego del establecimiento de las especies *M. sativa* y *T. officinale*. Para ambas especies, la concentración de mercurio, no se pudo determinar valores puntuales, debido a que estuvieron por debajo de los límites de detección del método (<0,1 mg/kg); en ambos casos no se sobrepasa el Estándar de calidad ambiental de suelo para este metal (6,6 mg/kg).

Tabla 5

Comparación de la concentración (mg/kg) de mercurio entre las dos especies

Réplica	<i>M. sativa</i>	<i>T. officinale</i>
1	<0,1	<0,1
2	<0,1	<0,1
3	<0,1	<0,1
Media	<0,1	<0,1
Desviación estándar	-	-
ECA (mg/kg)	6,6	

Fuente: D.S N° 011-2017-MINAM. - Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo

3.1.2.3 Concentración de cadmio con las especies *M. sativa* y *T. officinale*

La tabla 6 muestra la concentración de cadmio del suelo, luego del establecimiento de las especies *M. sativa* y *T. officinale*. Con la especie *M. sativa*, se encontró una concentración promedio de cadmio en el suelo del botadero de 1,13 mg/kg, mientras que con la especie *T. officinale*, la concentración de cadmio fue 1,36 mg/kg; ambos valores no sobrepasan el Estándar de calidad ambiental de suelo para este metal (1,4 mg/kg). Asimismo, la especie que retuvo la mayor cantidad de cadmio fue *M. sativa*.

Tabla 6

Comparación de la concentración (mg/kg) de cadmio entre las dos especies

Réplica	<i>M. sativa</i>	<i>T. officinale</i>
1	1,35	1,57
2	1,04	1,38
3	1,00	1,13
Media	1,13	1,36
Desviación estándar	0,19	0,22
ECA (mg/kg)	1,4	

Fuente: D.S N° 011-2017-MINAM. - Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo

3.1.3 Comparación de las eficiencias de remoción de metales pesados entre las dos especies

En esta sección se presenta la comparación de la concentración de metales pesados del suelo, entre las especies fitorremediadoras (*M. sativa* y *T. officinale*); con la finalidad de determinar la especie que presenta mayores ventajas para remover los metales pesados del suelo. Por otro lado, se presenta también la comparación de las eficiencias porcentuales de remoción de metales pesados del suelo, mediante el uso de las especies fitorremediadoras.

3.1.3.1 Comparación de la concentración de metales pesados entre las dos especies

a. Prueba T para la concentración de plomo

La tabla 7, muestra la prueba T para la concentración de plomo del suelo con las especies fitorremediadoras *M. sativa* y *T. officinale*. Se encontró un p-valor de 0,089; es decir no existe diferencia significativa entre los tratamientos; por tanto, con ambas especies se encontró una concentración de plomo similar, después de la aplicación de la técnica de fitorremediación.

Tabla 7*Prueba T para la concentración de plomo*

Especie	N	Media	p-valor
<i>M. sativa</i>	3	8,50	0,089
<i>T. officinale</i>	3	7,39	

Fuente: Elaboración propia

b. Prueba T para la concentración de cadmio

La tabla 8, muestra la prueba T para la concentración de cadmio del suelo con las especies fitorremediadoras *M. sativa* y *T. officinale*. Se encontró un p-valor de 0,122; es decir no existe diferencia significativa entre los tratamientos; por tanto, con ambas especies se encontró una concentración de cadmio similar, después de la aplicación de la técnica de fitorremediación.

Tabla 8*Prueba T para la concentración de cadmio*

Especie	N	Media	p-valor
<i>M. sativa</i>	3	1,13	0,122
<i>T. officinale</i>	3	1,36	

Fuente: Elaboración propia

3.1.3.2 Comparación de las eficiencias de remoción de metales pesados entre las dos especies**a. Comparación de la eficiencia de remoción de plomo**

La tabla 9 muestra las eficiencias de remoción de plomo del suelo del botadero, por las especies *M. sativa* y *T. officinale*. Con la especie *M. sativa*, se encontró una eficiencia de remoción de plomo del suelo de 9,68%; mientras que con la *T. officinale*, la eficiencia de remoción fue de 21,57%. La especie que obtuvo la mayor eficiencia de remoción de plomo del suelo del botadero fue *T. officinale*.

Tabla 9*Eficiencia de remoción de plomo con las dos especies*

Réplica	M. sativa	T. officinale
1	11,2	14,55
2	7,25	16,81
3	10,6	33,33
Media	9,68	21,57
Desviación estándar	2,13	10,25

Fuente: Elaboración propia

b. Comparación de la eficiencia de remoción de cadmio

La tabla 10 muestra las eficiencias de remoción de cadmio del suelo del botadero, por las especies *M. sativa* y *T. officinale*. Con la especie *M. sativa*, se encontró una eficiencia de remoción de cadmio del suelo de 79,82%; mientras que con la *T. officinale*, la eficiencia de remoción fue de 75,71%. La especie que obtuvo la mayor eficiencia de remoción de cadmio del suelo del botadero fue *M. sativa*.

Tabla 10*Eficiencia de remoción de cadmio con las dos especies*

Réplica	M. sativa	T. officinale
1	75,85	71,91
2	81,40	75,31
3	82,21	79,89
Media	79,82	75,71
Desviación estándar	3,46	4,00

Fuente: Elaboración propia

c. Comparación de las eficiencias de remoción de metales pesados entre las dos especies

La comparación de la eficiencia de remoción de metales pesados entre las dos especies, se realizó mediante la prueba T para dos muestras independientes. Para la comparación de la eficiencia de remoción de plomo entre ambas especies, se obtuvo un p-valor de 0,060; es decir ambas especies tienen la misma eficiencia de remoción de plomo del suelo. Por otro lado, con respecto a la eficiencia de remoción de cadmio, se encontró un p-valor de la

prueba T de 0,125; es decir ambas especies presentan el mismo potencial para remover cadmio del suelo (ver tabla 11).

Tabla 11

Comparación de las eficiencias de remoción entre las dos especies

Espece	N	Media	p-valor
Plomo			
<i>M. sativa</i>	3	9,68	0,06
<i>T. officinale</i>	3	79,82	
Cadmio			
<i>M. sativa</i>	3	21,57	0,125
<i>T. officinale</i>	3	75,71	

Fuente: Elaboración propia

3.2. Discusión

3.2.1 Sobre la concentración de metales pesados del suelo del botadero

Se encontró una concentración promedio de plomo de 9,41 mg/kg en el suelo del botadero de Yacucatina, distrito de Juan Guerra, San Martín. La presencia de plomo en suelo supone un riesgo para todo ser vivo, debido a su elevada biodisponibilidad, además por las características de persistencia en el ambiente y su no biodegradabilidad; por ello es imprescindible mantener las concentraciones de plomo en niveles que no causen daños al ambiente y a la salud pública. Por otro lado, debido a su elevada reactividad, puede ser tóxico para las células de plantas y animales. En las plantas, sus efectos se manifiestan en la reducción de los órganos como las raíces, el tallo y las hojas, debido al estrés oxidativo. Asimismo, pese a que la concentración de plomo en el suelo del botadero no sobrepasa el valor de referencia del ECA (70 mg/kg), Isaza (2013) sostiene que, la exposición a este metal pesado a bajas concentraciones puede provocar efectos tóxicos sobre la salud humana. Por otro lado, Torres (2018) indica que la presencia de plomo en los suelos de botaderos, se debe a la adsorción de este metal en las partículas de humus o arcilla del suelo de los botaderos, impidiendo de este modo su movilización; el autor también sostiene como una fuente de adición de plomo en el área del botadero a las lluvias, las cuales remueven el plomo contenido en el aire, pasando de este modo a la capa superior del suelo. De otro lado Ali, Pervaiz, Afzal, Hamid, & Yasmin (2014); encontraron altas concentraciones de plomo en el suelo del botadero de la ciudad de Islamabad, Pakistán; asimismo, sostienen que la presencia de metales pesados en el suelo reduce

considerablemente la diversidad vegetal de los botaderos; lo cual se atribuye a los cambios en las características del suelo en los sitios de disposición de residuos sólidos. Por otro lado, considerando la afectación a la salud, la exposición a elevadas concentraciones de plomo de los botaderos, puede producir daños en el sistema nervioso, aumento de la presión sanguínea y pérdida de las habilidades del aprendizaje (Njoku, Edokpayi, & Odiyo, 2019).

Asimismo, la concentración de mercurio en el suelo del botadero de Yacuatina, distrito de Juan Guerra, San Martín, fue inferior a 0,1 mg/kg; debido a que estuvieron por debajo de los límites de detección del método; sin embargo, esto no significa que no existe mercurio en el suelo. La presencia de metales pesados en áreas cercanas a los botaderos indica que hubo una contaminación apreciable del suelo por migración de lixiviados de los residuos sólidos (Ferronato & Torretta, 2019); los cuales pueden provenir de lámparas fluorescentes, cosméticos y equipos de telefonía móvil. Si bien, la concentración de mercurio del suelo del botadero de Yacuatina, no sobrepasó el límite máximo permisible de la norma nacional (6,6 mg/kg); ello no significa que la presencia de mercurio en concentraciones bajas no pueda provocar efectos tóxicos sobre la salud humana como deterioro de las habilidades cognitivas, temblores, alteraciones del sueño, disnea, deterioro de la función pulmonar, nerviosismo y tendencia suicida. De otro lado, los residuos sólidos con contenido de mercurio, al ser dispuestos en el botadero, parte del mercurio inorgánico es convertido por las bacterias que viven allí en una forma más tóxica, llamada mercurio orgánico o metilado. El mercurio orgánico se puede liberar a la atmósfera desde los botaderos de la misma manera que se libera el mercurio inorgánico (NEWMOA, 2020).

Por otro lado, la concentración promedio de cadmio en el suelo del botadero de Yacuatina, distrito de Juan Guerra, San Martín, fue de 5,60 mg/kg. La concentración de cadmio del suelo del botadero de Yacuatina, sobrepasó el límite máximo permisible de la norma nacional (1,4 mg/kg). Las fuentes de cadmio más importantes son desechos de los combustibles y puede representar una parte importante del cadmio observado en las cenizas volantes y las partículas atmosféricas; además existen otras fuentes que aportan cadmio como los plásticos y los pigmentos. De acuerdo con la EPA (2006), la presencia de cadmio en el suelo de botaderos, puede pasar a la manto freático mediante lixiviación, contaminando de esta manera las fuentes hídricas.

La presencia de metales pesados (plomo, mercurio, cadmio) en el suelo del botadero de Yacuatina, nos indica la necesidad de utilizar alternativas de descontaminación del suelo que sean ambientalmente sostenibles, por ello, en el presente estudio, se seleccionó la técnica de fitorremediación. Los metales pesados no se pueden descomponer durante el proceso de fito-remediación, como ocurre con los compuestos orgánicos; en su lugar se presentan los mecanismos de fito-estabilización, la fito-extracción y la fito-volatilización. En el mecanismo de fito-estabilización; los metales pesados, quedan retenidos en las raíces a través de la formación de complejos entre los metales y las sustancias quelantes propias de las raíces; mientras que en la fito-extracción, los metales pesados del suelo ingresan por las raíces y luego se transfieren a la parte aérea de la planta (tallo y hojas); en cambio en la fito-volatilización, el metal es transferido desde las raíces hasta la parte aérea y luego expulsado a través de los estomas; esto ocurre únicamente con el mercurio

3.2.2 Sobre la concentración de metales pesados después de la aplicación de la técnica de Fitorremediación

Después de la aplicación de la técnica de fitorremediación, la concentración promedio de plomo en el suelo con ambas especies *M. sativa* y *T. officinale*. En el caso de la especie *M. sativa*; la concentración se redujo desde 9,41 mg/kg hasta 8,50 mg/kg, estos valores cumplen con el Estándar de calidad ambiental de suelo (70 mg/kg); mientras que para la especie *T. officinale*, la concentración se redujo desde 9,41 mg/kg hasta 7,39 mg/kg, estos valores cumplen con el Estándar de calidad ambiental de suelo (70 mg/kg). La remoción de este metal por las plantas se presenta por el mecanismo de fito-extracción y fito-estabilización. La fito-extracción consiste en la absorción y translocación de los contaminantes hacia las partes aéreas de la planta; esta habilidad para absorber metales tóxicos del suelo, depende de cada especie vegetal; aunque, la habilidad para absorber nutrientes puede potenciarse al utilizar compuestos quelantes, los cuales permitirán la formación complejos con los metales pesados (Miniño et al., 2014). De acuerdo con Perl, Groffman, Moore, & Cheng (2020), las especies acumuladoras de plomo, son capaces de tolerar la exposición al Pb del suelo y secuestrarlo alrededor de la zona de la raíz, limitará el movimiento del Pb hacia otros ecosistemas, asimismo evitará la re-suspensión de polvos y mitigará la exposición al Pb. En el presente estudio, se encontró una mayor remoción de plomo con la especie *T. officinale*, esto se debe a la presencia de sustancias quelantes en las raíces como los ácidos orgánicos (cinámico y cumárico); alcaloides, flavonoides y

saponinas (Espadero, 2018). Las sustancias quelantes actúan en las raíces para estabilizar los metales pesados como el plomo, disminuyendo de este modo su bio-disponibilidad en el suelo; la fito-estabilización se puede presentar a través de la precipitación de metales pesados o la reducción de la valencia del metal en la rizósfera, la absorción y el secuestro dentro de los tejidos de las raíces o la adsorción en las paredes de las células de las raíces (Gerhardt, Gerwing, & Greenberg, 2017). Asimismo, la rizósfera de las especies fitorremediadoras, no solo estabiliza los metales pesados bajo tierra y minimiza su lixiviación al agua subterránea, sino que también evita la dispersión de partículas del suelo que contienen metales pesados por el viento (Mench et al., 2010). Por otro lado, una de las ventajas que se tiene al secuestrar el plomo mediante las raíces de *T. officinale*, es que no se requiere la eliminación de biomasa peligrosa en comparación con la fito-extracción; ya que el metal se acumula en las raíces formando complejos con las sustancias quelantes. A pesar que las raíces de la especie *M. sativa* son de mayor longitud (2.5 m) que las raíces de la especie *T. officinale* (0.30 m); esto no evidenció que la primera especie secuestrara mayor cantidad de plomo; posiblemente se deba a que la mayor cantidad de plomo se encontraba a menor profundidad; ya que la profundidad de sustrato de las cajas de madera fue de 0.20 m; es decir no favoreció el desarrollo de las raíces de la especie *M. sativa*.

Por otro lado, concerniente a la concentración de mercurio después de la aplicación de la técnica de fitorremediación, con ambas especies *M. sativa* y *T. officinale*, no se pudo determinar valores puntuales, debido a que estuvieron por debajo de los límites de detección del método (<0,1 mg/kg); probablemente se haya removido mercurio en cantidades muy pequeñas por ambas especies fito-remediadoras. La fito-volatilización se presenta cuando la planta absorbe agua junto con los contaminantes del suelo, los cuales están en solución. Los contaminantes se transportan hasta las hojas y luego se evaporan a la atmósfera (López, Gallegos, Pérez, & Gutiérrez, 2005). La fito-volatilización implica que las plantas facilitan la especiación de Hg^{2+} a Hg^0 , simultáneamente con su transferencia desde suelo a la atmósfera. Deberían poder absorber Hg^{2+} en las raíces y distribuirlo a otros tejidos que podrían poseer mecanismos reductores. Desde este punto, el Hg^0 volátil puede difundirse fuera de las células o hacia el xilema, y eventualmente escapa de los tejidos de la planta, ya sea directamente o por transpiración estomática (Tiodar, Văcar, & Podar, 2021).

Por otro lado, la concentración de cadmio del suelo del botadero de Yacucatina, se redujo, después de la aplicación de la técnica de fitorremediación, con las especies *M. sativa* y *T.*

officinale. En el caso de la especie *M. sativa*; la concentración se redujo desde 5,60 mg/kg hasta 1,13 mg/kg, este último valor cumple con el estándar de calidad ambiental de suelo (1,4 mg/kg); mientras que para la especie *T. officinale*, la concentración se redujo desde 5,60 mg/kg hasta 1,36 mg/kg, este último valor cumple con el estándar de calidad ambiental de suelo (1,4 mg/kg). La especie que secuestró una mayor cantidad de cadmio fue la *M. sativa*. La remoción de este metal por las plantas se presenta por el mecanismo de fito-estabilización. En este caso, las raíces ramificadas de la especie *M. sativa* favorecieron el secuestro de una mayor cantidad de cadmio a través del mecanismo de fito-estabilización, comparado a las raíces de la especie *T. officinale*, que son de mayor grosor y menos ramificadas que las raíces de la especie *M. sativa* (Zgorelec, Bilandzija, Knez, Galic, & Zuzul, 2020).

3.2.3 Sobre la comparación de las eficiencias de remoción de metales pesados entre las dos especies

Al comparar las eficiencias de remoción de plomo y cadmio del suelo del botadero de Yacuatina por las especies *M. sativa* y *T. officinale*, se encontró que la concentración de plomo y cadmio con ambas especies al final del ensayo fue estadísticamente igual. Las eficiencias de remoción de plomo con las especies *M. sativa* y *T. officinale* fue respectivamente 9,68% y 21,57%; mientras que para las eficiencias de remoción de cadmio fue respectivamente 79,82% y 75,71%. De acuerdo con Li, Zhu, Wang, & Zhang (2020) las raíces de la especie *M. sativa* en simbiosis con los microorganismos de la rizósfera desarrollan el proceso metabólico de estabilización de los metales pesados como el cadmio; asimismo, los autores mencionan que esta especie vegetal es eficiente en la remoción de cadmio de suelos contaminados. Por otro lado, la especie *M. sativa* tiene el potencial para estabilizar metales pesados mediante el mecanismo de fito-estabilización; es decir, los metales pesados se acumulan (inmovilizan) en las raíces de esta especie vegetal (Meira, 2016). De otro lado, Jadia & Fulekar (2008) encontraron que, la especie *M. sativa* presenta una alta absorción de cadmio en las concentraciones de 5 a 50 ppm. Durante el mecanismo de fitorremediación, esta especie vegetal desarrolla una rizósfera activa y una elevada producción de biomasa, la cual se utiliza para la absorción de metales pesados. Para Castillo (2013), la especie *M. sativa* es hiper-acumuladora de metales pesados como plomo y cadmio, alcanzando valores de 65 y 3.9 mg/kg de Pb en el tallo, respectivamente. Por otro lado, Lopes (2012) sostiene que la especie *T. officinale* se

caracteriza por presentar una alta eficiencia en la remoción de cadmio del suelo, por ello es recomendable su uso para la fito-extracción de metales tóxicos del suelo como el cadmio. González (2014), al contaminar el suelo con plomo a una concentración de 300 mg/kg, encontró una cantidad de 0,822 mg/kg de plomo en los tejidos de *T. officinale*, evidenciando con esto que esta especie tiene el potencial de fito-extraer cadmio del suelo. A pesar que en el presente estudio, se encontró una menor eficiencia de remoción de plomo, comparado a la especie *M. sativa*; Bini et al. (2012) menciona, la especie *T. officinale* acumula altas concentraciones de plomo, tanto en las raíces como en el tallo, encontrando un factor de translocación igual a 1; posiblemente esta diferencia deba a otros factores como el pH del suelo, la granulometría, el contenido de materia orgánica, el porcentaje de humedad, el potencial redox, la capacidad de intercambio catiónico y la salinidad.

CONCLUSIONES

- La concentración promedio de plomo en el suelo del botadero fue 9,41 mg/kg, este valor, no sobrepasa el Estándar de calidad ambiental de suelo para este metal (70 mg/kg). Por otro lado, concierne a la concentración de mercurio, no se pudo determinar valores puntuales, debido a que estuvieron por debajo de los límites de detección del método ($<0,1$ mg/kg). Mientras que, para el cadmio, se encontró una concentración promedio de 5,60 mg/kg, sobrepasando el Estándar de calidad ambiental de 1,4 mg/kg.
- Con la especie *M. sativa*, se encontró una concentración promedio de plomo en el suelo del botadero de 8,50 mg/kg, mientras que con la especie *T. officinale*, la concentración de plomo fue 7,39 mg/kg; ambos valores no sobrepasan el Estándar de calidad ambiental de suelo para este metal (70 mg/kg). Asimismo, se encontró una concentración promedio de cadmio en el suelo del botadero de 1,13 mg/kg con *M. sativa*, mientras que con la especie *T. officinale*, la concentración de cadmio fue 1,36 mg/kg; ambos valores no sobrepasan el Estándar de calidad ambiental de suelo para este metal (1,4 mg/kg).
- Con la especie *M. sativa* se encontró una eficiencia de remoción de plomo del suelo de 9,68%, mientras que con la *T. officinale*, la eficiencia de remoción fue de 21,57%; asimismo, para la remoción de cadmio, la especie *M. sativa*, obtuvo una eficiencia de 79,82%; mientras que con la *T. officinale*, la eficiencia de remoción fue de 75,71%.
- Finalmente, la especie que retuvo la mayor cantidad de plomo fue *T. officinale*, mientras que, la especie que retuvo la mayor cantidad de cadmio fue *M. sativa*, por tanto, ambas especies pueden ser utilizadas promisoriamente para descontaminación de suelos por sustancias tóxicas como metales pesados.

RECOMENDACIONES

- Utilizar las especies vegetales *M. sativa* y *T. officinale*, para la descontaminación de suelos con altas concentraciones de plomo y cadmio; ya que en el presente estudio se demostró que ambas especies tienen el potencial para remover estos metales tóxicos del suelo.
- Desarrollar estudios de fitorremediación de metales pesados utilizando otras especies vegetales, con una finalidad de comparar el porcentaje de remoción de estos metales tóxicos; ya que la técnica de fitorremediación es una alternativa ambientalmente sostenible para la descontaminación de suelos.
- Aplicar la técnica de fitorremediación, la cual es amigable con el ambiente, con una finalidad de descontaminar a gran escala el suelo del botadero Yacuatina, ya que en el presente estudio se demostró su elevada capacidad para remover metales pesados, especialmente plomo y cadmio.
- Evaluar la concentración de mercurio en el suelo del botadero, utilizando el límite de cuantificación menor a 0,1 mg/kg.
- Socializar la presente tesis con la Municipalidad Provincial de San Martín, para que sea evaluado y posteriormente sea utilizado como proyecto piloto en la descontaminación del suelo del botadero de Yacuatina como parte de la etapa de cierre ambiental de dicha instalación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alaboudi, K. A., Ahmed, B., & Brodie, G. (2018). Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant. *Annals of Agricultural Sciences*, 63(1), 123–127. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2018.05.007>
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Ali, S. M., Pervaiz, A., Afzal, B., Hamid, N., & Yasmin, A. (2014). Open dumping of municipal solid waste and its hazardous impacts on soil and vegetation diversity at waste dumping sites of Islamabad city. *Journal of King Saud University - Science*, 26(1), 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.08.003>
- Alva, B. (2015). Capacidad Bioacumuladora de Plomo, a diferentes Concentraciones, en Raíz, Tallo y Hoja en *Taraxacum Officinale* en Condiciones de Laboratorio. *Sagasteguiana*, 1(2), 51–60. Retrieved from <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/REVSAGAS/article/view/1799>
- Amado, S., & Chaves, J. (2015). *Fitorremediação - Uma alternativa sustentável para remediação de solos contaminados*. 13, 158–164.
- Antoniadis, V., Levizou, E., Shaheen, S. M., Okc, Y. S., Sebastian, A., Baum, C., ... Jörg, R. (2017). Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation—A review. *Earth-Science Reviews*, 171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.005>
- Bini, C., Wahsha, M., Fontana, S., & Maleci, L. (2012). Effects of heavy metals on morphological characteristics of *Taraxacum officinale* Web growing on mine soils in NE Italy. *Journal of Geochemical Exploration Volume*, 123(1), 1.
- Castillo, B. (2013). *El efecto del EDTA sobre *Medicago sativa* L. y *Cynodon dactylon* L. en la extracción de metales pesados de suelo de Cuemanco, México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chirakkara, R., Cameselle, C., & Reddy, K. (2016). Assessing the applicability of phytoremediation of soils with mixed organic and heavy metal contaminants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 15(2). <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9391-0>
- Cuniasse, B. (2020). *Métaux lourds*. Retrieved from https://www.citepa.org/wp-content/uploads/1.3-ML_2020.pdf

- Da Silva, T. J., Hansted, F. A. S., Tonello, P. S., & Goveia, D. (2019). Phytoremediation of soils contaminated with metals: Current outlook and prospects of use of forest species. *Revista Virtual de Quimica*, *11*(1), 18–34. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20190003>
- Dalvi, A. A., & Bhalerao, S. A. (2013). Response of Plants towards Heavy Metal Toxicity: An overview of Avoidance, Tolerance and Uptake Mechanism. *Annals of Plant Sciences*, *2*(9), 362–368.
- DIGESA. (2004). Guía técnica para la clausura y conversión de botaderos de residuos sólidos. In *Ministerio De Salud Digesa*. Retrieved from <http://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/1650.pdf>
- Dubey, S., Shri, M., Gupta, A., Rani, V., & Chakrabarty, D. (2018). Toxicity and detoxification of heavy metals during plant growth and metabolism. *Environmental Chemistry Letters*, *16*(4), 1169–1192. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0741-8>
- EPA. (2006). *Concentration of cadmium, lead and zinc and their leaching in municipal solid waste dumping sites at Bhubaneswar city (Orissa)*. Retrieved from https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/364783
- Espadero, S. G. (2018). *Comparación de la capacidad antioxidante de cuatro metabolitos secundarios presentes en Taraxacum officinale (diente de león) frente a n- acetil cisteína un antioxidante comercial*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Fernández, T. (2018). *Biorremediación con Penicillium spp, Phanerochaete spp y Trychoderma spp de suelos contaminados con DDT. Moyobamba – 2016* (Universidad Nacional de San Martín). Retrieved from [http://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/2800/AMBIENTAL - Tania Marilin Fernandez Brito.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/2800/AMBIENTAL_Tania_Marilin_Fernandez_Brito.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(6). <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>
- Gerhardt, K., Gerwing, P., & Greenberg, B. (2017). Opinion: Taking phytoremediation from proven technology to accepted practice. *Plant Sci.*, *1*(256). <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.11.016>
- Gonzales, J., Acebedo, J., Armas, C., Custodio, M., García, M., Gonzales, A., ... Vásquez, M. (2018). *“Fitorremediación de un Suelo con Exceso de Cobre utilizando Cuatro Especies Vegetales; “Girasol”, “Alfalfa”, “Geranio” e “Higuerilla*. Universidad Católica de Trujillo “Benedicto XVI.”
- González, R. (2014). *Recuperación de Suelos Contaminados con Metales Utilizando Especies*

- Vegetales-Fitoremediación* (Escuela Politécnica Nacional). Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8616>
- Greggi, H. (2017). *Fitorremediação de solos contaminados por metais pesados* (Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Retrieved from <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6829/1/fitorremediacaosoloscontaminadosmetais.pdf>
- Greipsson, S. (2011). Phytoremediation. *Nature Education Knowledge*, 3(10).
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta). Retrieved from <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Hoppen, S. (2021). *Crescimento e desenvolvimento de alfafa (Medicago sativa L.) com diferentes níveis de dormência e frequências de desfolhação contrastantes*. Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
- Irfan, M., Mudassir, M., Khan, M. J., Dawar, K. M., Muhammad, D., Mian, I. A., ... Dewil, R. (2021). Heavy metals immobilization and improvement in maize (*Zea mays* L.) growth amended with biochar and compost. *Scientific Reports*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97525-8>
- Isaza, G. (2013). Efecto del plomo sobre la imbibición, germinación y crecimiento de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L. *Biotecnología Vegetal*, 13(3). Retrieved from <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/114/472>
- Jadia, C. D., & Fulekar, M. H. (2008). *Phytotoxicity and Remediation of Heavy Metals by Alfalfa (Medicago sativa) in Soil-vermicompost Media*. 2(3), 141–151. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/228556169_Phytotoxicity_and_Remediation_of_Heavy_Metals_by_Alfalfa_Medicago_sativa_in_Soil-vermicompost_Media
- Kajka, K., & Rutkowska, B. (2018). Accumulation of selected heavy metals in soils and common dandelion (*Taraxacum officinale*) near a road with high traffic intensity. *Soil Science Annual 2018*, 69(1), 6. Retrieved from <http://ieeauthorcenter.ieee.org/wp-content/uploads/IEEE-Reference-Guide.pdf%0Ahttp://wwwlib.murdoch.edu.au/find/citation/ieee.html%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.022%0Ahttps://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper%0Ahttps://tore.tuhh.de/hand>
- Kazmierczak, R. (2018). *Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo em sistemas de preparo* (Universidade Estadual de Ponta Grossa). Retrieved from <http://ieeauthorcenter.ieee.org/wp-content/uploads/IEEE-Reference-Guide.pdf%0Ahttp://wwwlib.murdoch.edu.au/find/citation/ieee.html%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.022%0Ahttps://github.com/ethereum/wiki/wiki/White->

Paper%0Ahttps://tore.tuhh.de/hand

- Li, L., Zhu, P., Wang, X., & Zhang, Z. (2020). Phytoremediation effect of *Medicago sativa* colonized by *Piriformospora indica* in the phenanthrene and cadmium co-contaminated soil. *BMC Biotechnology*, 20(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12896-020-00613-2>
- Lizana, J. (2019). *Aplicación de carbón activado de cáscara de “coco” y cascarilla de “arroz” para la biorremediación de suelos contaminados por gasolina, distrito y provincia de Moyobamba - 2018* (Universidad Nacional de San Martín). Retrieved from http://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/3888/FIAI_Larry_Amasifuen_Pinchi.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lone, M. I., He, Z. L., Stoffella, P. J., & Yang, X. E. (2008). Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives. *Journal of Zhejiang University: Science B*, 9(3), 210–220. <https://doi.org/10.1631/jzus.B0710633>
- Lopes, E. (2012). *Fitorremediação: uma visão do método aplicado a solos contaminados e apresentação de tópicos relevantes da fitoextração* (Universidade Federal de Minas Gerais). <https://doi.org/10.21450/rahis.v0i2.782>
- López, M. (2017). *Mezquite (Prosopis laevigata) como alternativa para la recuperación de suelos contaminados por cobre*. Benemérita Universidad Autónoma De Puebla.
- López, S., Gallegos, M., Pérez, L., & Gutiérrez, M. (2005). Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 21(2). <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2495-z>
- Mahardika, G., Rinanti, A., & Fachrul, M. F. (2018). Phytoremediation of heavy metal copper (Cu²⁺) by sunflower (*Helianthus annuus* L.). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 106(1), 0–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/106/1/012120>
- Meira, V. A. M. (2016). *O potencial da fitorremediação para a recuperação das escombrelas das minas de Penedono e Aljustrel*. Universidade de Aveiro.
- Mench, M., Lepp, N., Bert, V., Schwitzguébel, J. P., Gawronski, S. W., Schröder, P., & Vangronsveld, J. (2010). Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859. *Journal of Soils and Sediments*, 10(6).
- MINAM. (2014, March). DECRETO SUPREMO N° 002-2014-MINAM Aprueban disposiciones complementarias para la aplicación de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo 519448. *Aprueban Disposiciones Complementarias Para La Aplicación de Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Para Suelo*, p. 3.
- Miniño, H., Rendina, A., Barros, M. J., Bursztyn, A., Ríos, D. L., Wassner, D., & Iorio, A. F.

- De. (2014). Uso de ligandos orgánicos en la fitoextracción de Plomo por Ricino (*Ricinus communis* L.). *Augmdomus*, 6(0), 66–80.
- Munive, R., Loli, O., Azabache, A., & Gamarra, G. (2018). Phytoremediation with corn (*Zea mays* L.) and Stevia compost on soils degraded by contamination with heavy metals. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 551–560. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.11>
- NEWMOA. (2020). *Summary of Research on Mercury Emissions from Municipal Landfills*. Retrieved from <http://www.newmoa.org/prevention/mercury/landfillfactsheet.cfm>
- Njoku, P. O., Edokpayi, J. N., & Odiyo, J. O. (2019). Health and environmental risks of residents living close to a landfill: A case study of thohoyandou landfill, Limpopo province, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(12), 10–12. <https://doi.org/10.3390/ijerph16122125>
- Papuico, K. (2018). *Técnica de fitorremediación en la extracción de metales pesados con la planta Yaluzai (Senecio rudbeckiaefolius) en la relavera de Quiulacocha del distrito de Simón Bolívar de Rancas*. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
- Pequeno, O., Silva, L., & Nascimento, M. (2014). Fitoextração de sais através de estresse salino por atriplex nummularia em solo do semiárido paraibano. *Revista Saúde e Ciência*, 3(3), 37–52.
- Perl, S., Groffman, P., Moore, G., & Cheng, Z. (2020). The limits of lead (Pb) phytoextraction and possibilities of phytostabilization in contaminated soil: a critical review. *Int J Phytoremediation*, 22(9). Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32677841/>
- Pietropaoli, S. (2014). *Mesocosmi sperimentali per lo studio dei processi fisiologici di specie arboree forestali nell ' ambito della fitodepurazione : recupero di acque contaminate per la produzione di biomassa legnosa*.
- Pinto, B., & Ferreira, J. (2018). *Estudo das propriedades e potencialidades da Taraxacum officinale (Dente de Leão)*. Universidade do Vale do Paraíba.
- Pizarro, R., Flores, J., Tapia, J., Valdés Pineda, R., Gonzáles, D., Morales, C., ... León, L. (2015). *Especies Forestales para la Recuperación de Suelos Contaminados con Cobre debido a Actividades Mineras*. 22(Apa 6), 3–15. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.06.026>
- Pombosa, A. (2016). *Determinación de las etapas fenológicas del cultivo de alfalfa (Medicago sativa) var. morada paisana bajo las condiciones climáticas del cantón Cevallos* (Universidad Técnica de Ambato). Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2009.07.006><http://dx.doi.org/10.1016/j.neps.2015.06.001><https://www.abebooks.com/Trease-Evans-Pharmacognosy-13th-Edition->

[William/14174467122/bd](#)

- Recharte, F., Mejia, R., & Fajardo, V. (2018). *Fitorremediación con Ricinus communis para el tratamiento de suelos contaminados con plomo*. Universidad Nacional del Callao.
- Ribeiro, M. (2013). *Contaminação do solo por metais pesados* (Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias). Retrieved from <https://recil.grupolusofona.pt/jspui/bitstream/10437/4770/1/TeseFinalMarcosRibeiro27-01-14.pdf>
- Ríos, S., & Saavedra, W. (2019). *Mejoramiento del suelo en cultivos de arroz a través del abonamiento con cascarilla de café y agua miel de cacao, Tarapoto, 2019*. Universidad César Vallejo.
- Samamé, F., & Osore, B. (2020). *Capacidad del Gynesium sagittatum para la fitorremediación de suelos de cultivos arroz con metales pesados bajo condiciones controladas, Moyobamba, 2020* (Universidad César Vallejo). Retrieved from http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sheoran, V., Sheoran, A., & Poonia, P. (2016). Factors Affecting Phytoextraction: A Review. *Pedosphere*, 26(2). [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60032-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60032-7)
- Song, B., Zeng, G., Gong, J., Liang, J., Xu, P., Liu, Z., ... Ren, X. (2017). Evaluation methods for assessing effectiveness of in situ remediation of soil and sediment contaminated with organic pollutants and heavy metals. *Environment International*, 105. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.001>
- Supo, J. (2015). Cómo Empezar una Tesis. *Bioestadístico*, 70.
- Tchang, V. (2018). *La Phytoremédiation Des Sols Dans Le Sertão Brésilien*. Université de Sherbrooke.
- Tiodar, E. D., Văcar, C. L., & Podar, D. (2021). Phytoremediation and microorganisms-assisted phytoremediation of mercury-contaminated soils: Challenges and perspectives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 1–38. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052435>
- Torres, J. (2016). *Acumulación De Nitrógeno En Dos Ciclos De Producción En Zona Humeda Tropical Zona Humeda Tropical*. Universidad Nacional de Colombia.
- Torres, N. (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 (Universidad nacional del altiplano). Retrieved from http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/9412/Torres_Quispe_Nely_Elm

[a.pdf?sequence=1&isAllowed=y](#)

- Valente, E. (2008). *Absorção de metais pesados de solos contaminados do aterro sanitário e pólo industrial de manaus pelas espécies de plantas Senna multijuca, Schizolobium amazonicum E Caesalpinia echinata*. Universidade Federal do Amazonas.
- Vasconcellos, M. C., Pagliuso, D., & Sotomaior, V. S. (2012). Fitorremediação: Uma proposta de descontaminação do solo. *Estudos de Biologia*, 34(83), 261–267. <https://doi.org/10.7213/estud.biol.7338>
- Vásquez, F. (2010). *Evaluación del índice de calidad del agua en el área de influencia del botadero municipal de Tarapoto sector Yacucatina San Martin – Perú* (Universidad Nacional de San Martín). Retrieved from <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/UNSM/461>
- Vázquez, E., & Rojas, T. (2016). *pH: Teoría y problemas*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Yadav, K., Gupta, N., Kumar, A., Reece, L., Singh, N., Rezanian, S., & Khan, S. (2018). Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects. *Ecological Engineering*, 120(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.039>
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in Plant Science*, 11(April), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>
- Zapata, J. (2019). *Contenido de metales pesados en vegetación alrededor de una mina cerrada en la región Piura* (Universidad de Piura). Retrieved from <https://www.google.com/search?q=efectos+toxicos+sobre+la+flora+y+fauna+en+piura+peru&tbm=isch&source=univ&sa=X&ved=2ahUKEwj74XcmablAhXLslkKHTKyAhwQsAR6BAGJEAE>
- Zgorelec, Z., Bilandzija, N., Knez, K., Galic, M., & Zuzul, S. (2020). Cadmium and Mercury phytostabilization from soil using *Miscanthus × giganteus*. *Scientific Reports*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63488-5>

ANEXOS

Anexo A.

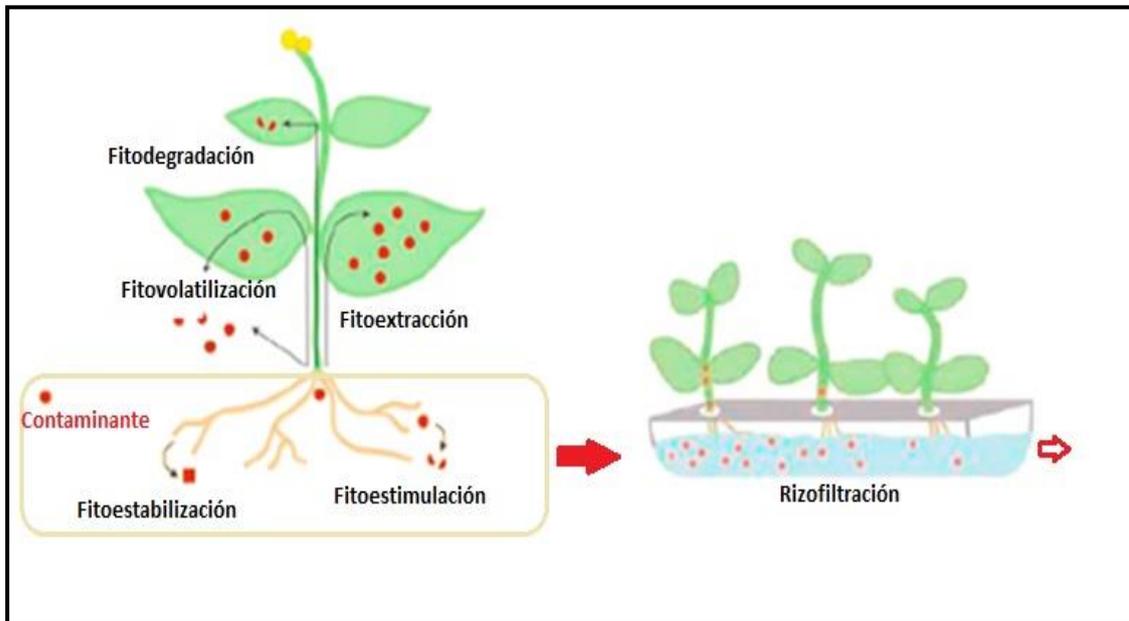
Operacionalización de las variables

Variable	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Escala de medición
Independiente: Especies Fitorremediadoras	Es la especie vegetal que permitirá remediar el suelo del botadero Yacucatina.	Especie fitorremediadora	Nº plántulas de <i>Medicago sativa</i> (Alfalfa)	27 plántulas <i>Medicago sativa</i> (Alfalfa)
			Nº plántulas de <i>Taraxacum officinale</i> (Diente de León)	27 plántulas <i>Taraxacum officinale</i> (Diente de León)
Dependiente: Concentración de metales pesados	Es la masa en microgramos de metal pesado que hay por cada medio kilogramo de suelo	Concentración de Metales pesados	Pb	EPA 3050/Espectrometría de masa
			Hg	EPA 6020/Espectrometría de masa
			Cd	EPA 3051/Espectrometría de mas

Fuente: Elaboración propia

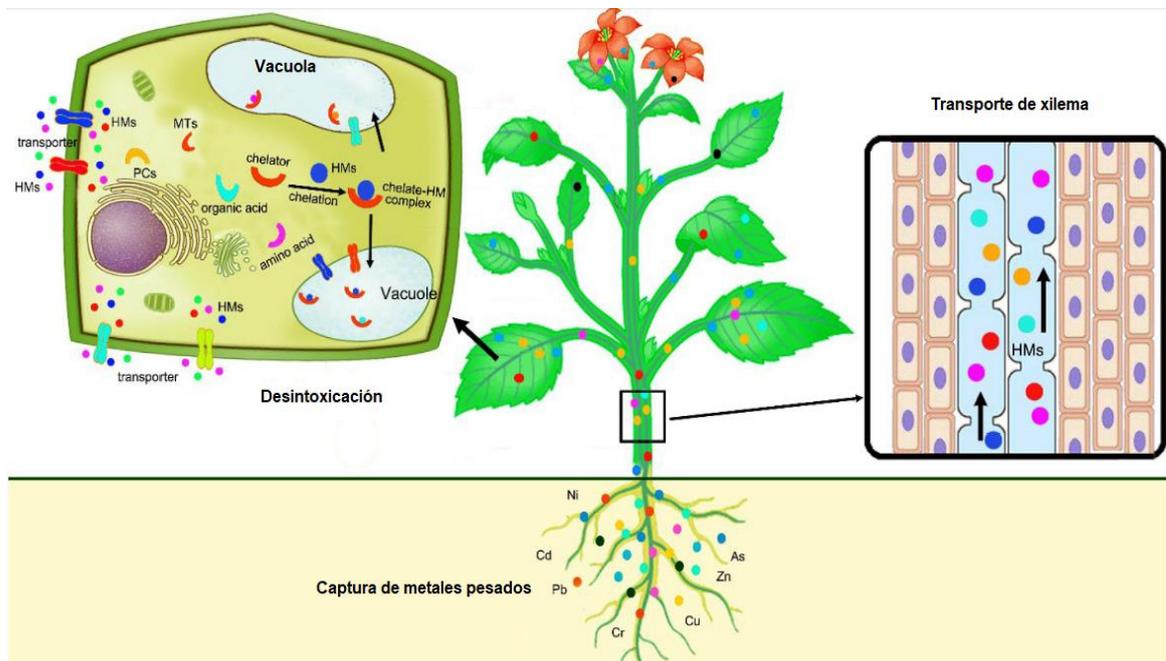
Anexo B.

Mecanismos de fitorremediación



Anexo C.

Mecanismo de transferencia de metales hacia la planta



Anexo D.

Carta de autorización para el desarrollo de la investigación

**MUNICIPALIDAD PROVINCIAL
DE SAN MARTÍN**

"AÑO DE LA UNIVERSALIZACIÓN DE LA SALUD"

CONSTANCIA:**HACE CONSTAR:**

Que la estudiante **Karina Silva Mori**, de la Maestría en Ciencias con Mención en Gestión Ambiental de la Universidad Nacional de San Martín, está Autorizado a realizar la investigación titulada: **"UTILIZACIÓN DE LAS ESPECIES *MEDICAGO SATIVA* Y *TARAXACUM OFFICINALE* EN LA FITORREMIEDIACIÓN DE PLOMO, MERCURIO Y CADMIO DEL BOTADERO YACUCATINA"** para obtener el grado de magister en gestión ambiental.

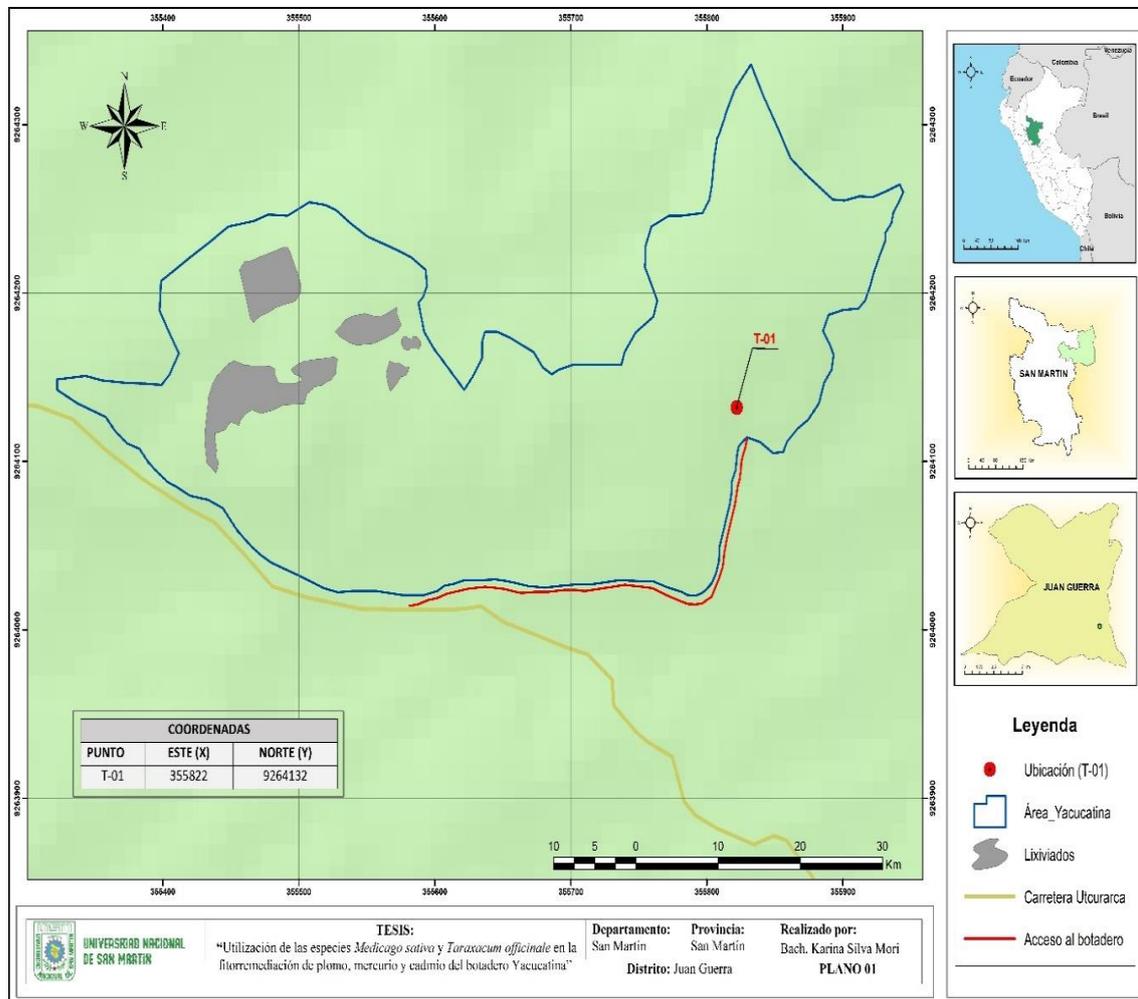
Se expide la presente constancia, a solicitud del interesado para los fines que crea conveniente.

Tarapoto, 24 de setiembre del 2020

MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE SAN MARTÍN - TARAPOTO
Mg. VICTOR HUGO SÁNCHEZ REATEGUI
GERENTE DE ADMINISTRACIÓN

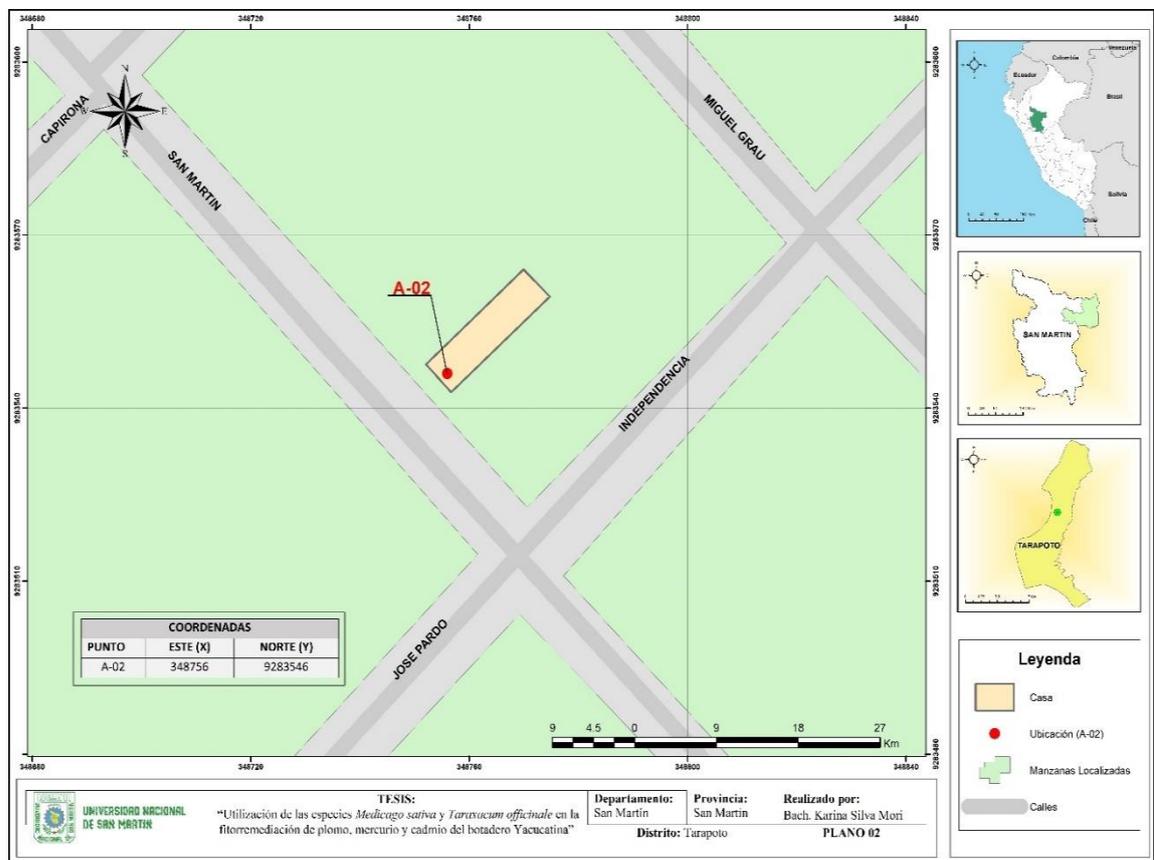
Anexo E.

Mapa de ubicación de la obtención de suelo contaminado del botadero



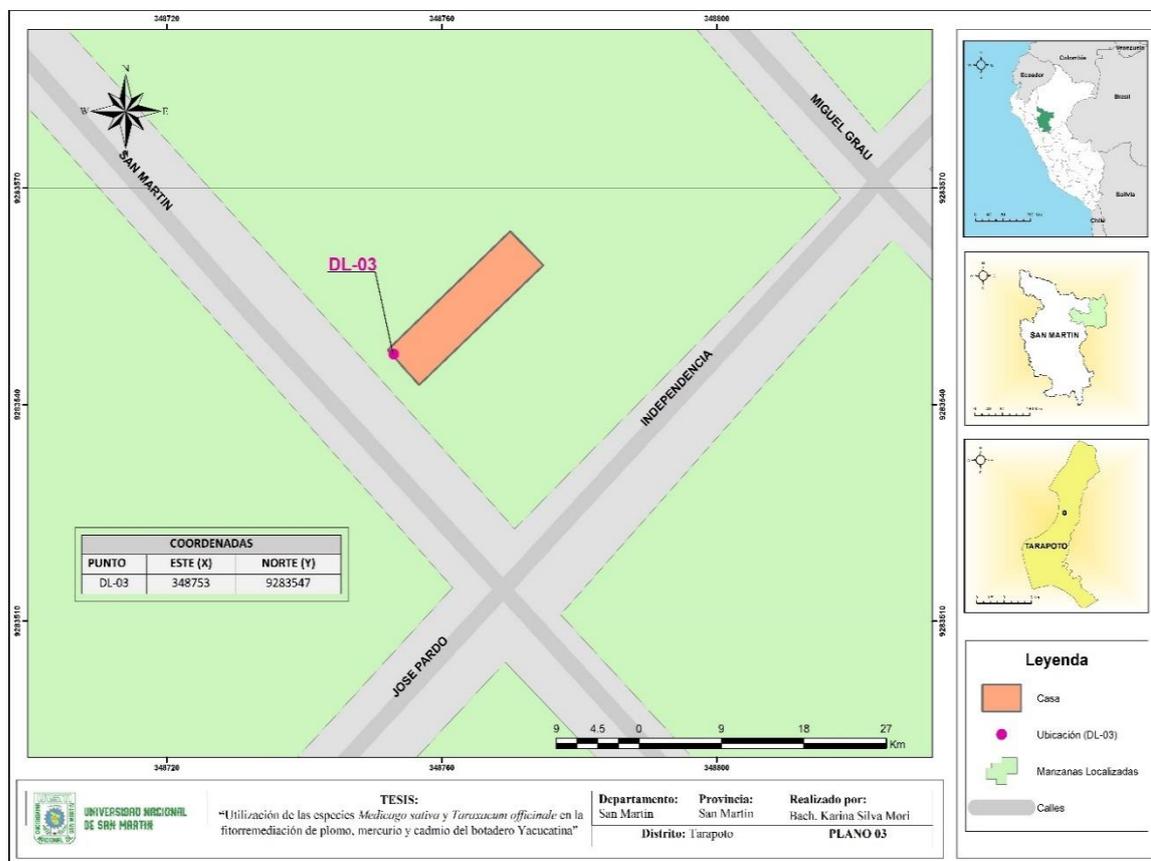
Anexo F.

Mapa de ubicación de las unidades experimentales de *M. sativa*



Anexo G.

Mapa de ubicación de las unidades experimentales de *T. officinale*



Anexo H.

Cadena de custodia de monitoreo de las muestras testigo

P.E. 122613
Página 1 de 1

CADENA DE CUSTODIA DE MONITOREO - DE AGUAS Y SUELOS

Cliente: Karina Silva Mori Contacto: Ing. Karina Silva Mori E-mail: ingenieros@ambiente.com.ec Telef. (s) 994742265
 Lugar: Tarapoto - San Martín Empresa: _____ Planta: _____ Proyecto: ESIS
 Cuarta/Cotización: _____ MUESTREO POR SAG _____ MUESTREO POR CUBO

PUNTO DE MUESTREO & CODIGO DEL CLIENTE	MUESTREO		TIPO DE MATRIZ	PARAMETROS IN SITU	ANÁLISIS DE LABORATORIO			N° Informe	DATOS ADICIONALES
	FECHA	HORA			Mercurio	Cadmio	Plomo		
T-1.1	07-10-2020	7:30	Suelo	Mercurio ✓ Cadmio ✓ Plomo ✓					
T-1.2	07-10-2020	8:15	Suelo	Mercurio ✓ Cadmio ✓ Plomo ✓					
T-1.3	08-10-2020	10:20	Suelo	Mercurio ✓ Cadmio ✓ Plomo ✓					

Obs: Observaciones de Muestreo: (Testigo: T-1.1) // (Testigo: T-1.2) // (Testigo: T-1.3)
 No: Nombre(s) y Apellido(s) del Responsable del muestreo: Ing. Karina Silva Mori Firma(s): [Firma]
 No: Nombre(s) y Apellido(s) del Responsable o Supervisor en campo: _____ Firma(s): _____ Día/Hora: _____

Anexo J.

Cadena de custodia de monitoreo de la muestra de suelo, utilizando *T. officinale*

FR - 005
Versión: 06
F.E: 11/2019
Página: 1 de 1



CADENA DE CUSTODIA DE MONITOREO - DE AGUAS Y SUELOS

Cliente: Karina Silva Mort Contacto: Ing Karina Silva Mort E-mail: ingenierosambiente@gmail.com Telef(s) 9547423
Lugar: Tarapoto - San Martín Empresa: _____ Planta: _____ Proyecto: 70515

MUESTREO			MUESTREO POR SAG		MUESTREO POR CLIENTE	
PUNTO DE MUESTREO & CÓDIGO DEL CLIENTE	FECHA	HORA	TIPO DE MATRIZ	Nº Informe:		
DL-31	28-10-2020	9:45	Suelo	Código del Laboratorio:		
PARAMETROS IN SITU				ANÁLISIS DE LABORATORIO		
Hierro <input checked="" type="checkbox"/> Plomo <input checked="" type="checkbox"/> Cadmio <input checked="" type="checkbox"/> V <input checked="" type="checkbox"/>				DATOS ADICIONALES		

Observaciones de Muestreo: (Diente de Leon - DL-31) - Taraxacum officinale
 Nombre(s) y Apellido(s) del Responsable del muestreo: _____ Recibido en laboratorio: _____
 Nombre(s) y Apellido(s) del Responsable o Supervisor en campo: _____ Día/Hora: _____

Anexo K.

Informe de ensayo de la concentración de metales pesados-control



SAG

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO
INTERNATIONAL ACCREDITATION SERVICE, INC. - IAS
CON REGISTRO TL - 829



**INFORME DE ENSAYO N° 154171 - 2021
CON VALOR OFICIAL**

CLIENTE : KARINA SILVA MORI
DOMICILIO LEGAL : JR. DOS DE MAYO NRO. 339 - LAMAS - SAN MARTÍN - LAMAS
SOLICITADO POR : ING. KARINA SILVA MORI
REFERENCIA : TESIS - POSTGRADO
PROCEDENCIA : TARAPOTO - SAN MARTÍN
FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS : 2020-10-08
FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2020-10-08 AL 2020-08-21
FECHA(S) DE MUESTREO : 2020-10-07
MUESTREO POR : EL CLIENTE
CONDICIÓN DE LA MUESTRA : LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS SE APLICAN A LA MUESTRA(S) TAL COMO SE RECIBIÓ.

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayo	Método	L.C.	Unidades
Metales: Cadmio, Plomo, Mercurio.	EPA 3050-B (1996) / Method 200.7 Rev. 4.4 EMMC Version (1994). Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils by Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry.	---	mg/kg

L.C.: límite de cuantificación.

II. RESULTADOS:

Producto declarado	Suelo	Suelo	Suelo
Matriz analizada	Suelo	Suelo	Suelo
Fecha de muestreo	2020-10-07	2020-10-07	2020-10-07
Hora de inicio de muestreo (h)	07:30	08:15	10:20
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada
Código del Cliente	TESTIGO (T1)	TESTIGO (T2)	TESTIGO (T3)
Código del Laboratorio	21080131	21080132	21080133
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados
Metales			
Cadmio (Cd)	0.05	mg/kg	5.59 5.59 5.62
Mercurio (Hg)	0.1	mg/kg	<0.1 <0.1 <0.1
Plomo (Pb)	0.05	mg/kg	9.55 9.52 9.15

L.D.M.: límite de detección del método.

Resultados de Suelo reportados en base seca.

Lima, 18 de Octubre del 2020.

Quim. César Antonio Poma Pando
GERENTE GENERAL
C.Q.P. N° 719
Servicios Analíticos Generales S.A.C.

EXPERTS
WORKING
FOR YOU

Cod.:FI 005/versión: 02/F.E.04/2021

OBSERVACIONES: • Está prohibida la reproducción parcial o total del presente documento a menos que sea bajo la autorización escrita de Servicios Analíticos Generales S.A.C. • Los resultados emitidos en este documento sólo son válidos para las muestras referidas en el presente informe. • Las muestras serán conservadas de acuerdo al período de perechibilidad del parámetro analizado con un máximo de 30 días de haber ingresado las muestras al laboratorio. Luego serán eliminadas. • Para corroborar la AUTENTICIDAD del presente informe comunicarse al correo laboratorio@sagperu.com. • Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados de acuerdo a ley.

SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

Laboratorio Av. Naciones Unidas N° 1565 Urb. Chacra Ríos Norte - Lima • Oficinas Administrativas Pasaje Clorinda Malto de Turner N° 2079 - Lima
• Central Telefónica (511) 425-6885 • Web: www.sagperu.com • Contacto Electrónico sagperu@sagperu.com

Página 1 de 1

Anexo L.

Informe de ensayo de la concentración de metales pesados-diente de león



SAG

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO
INTERNATIONAL ACCREDITATION SERVICE, INC. - IAS
CON REGISTRO TL - 829



INFORME DE ENSAYO N° 154172 - 2021
CON VALOR OFICIAL

CLIENTE : KARINA SILVA MORI
DOMICILIO LEGAL : JR. DOS DE MAYO NRO. 339 - LAMAS - SAN MARTÍN - LAMAS
SOLICITADO POR : KARINA SILVA MORI
REFERENCIA : TESIS POSTGRADO
PROCEDENCIA : TARAPOTO - SAN MARTÍN
FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS : 2020-10-29 / 2021-02-02 / 2021-05-04
FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2020-10-29 AL 2020-10-11-13
FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2021-02-02 AL 2021-02-17
FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2021-05-04 AL 2021-05-20
FECHA(S) DE MUESTREO : 2020-10-28 / 2021-02-01 / 2021-05-03
MUESTREO POR : EL CLIENTE
CONDICIÓN DE LA MUESTRA : LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS SE APLICAN A LA MUESTRA(S) TAL COMO SE RECIBIÓ.

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayo	Método	L.C	Unidades
Metales: Cadmio, Plomo, Mercurio.	EPA 3050-B (1996) / Method 200.7 Rev. 4-4 EMMC Version (1994). Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils / Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry.	---	mg/kg

L.C.: límite de cuantificación.

II. RESULTADOS:

Producto declarado	Suelo	Suelo	Suelo
Matriz analizada	Suelo	Suelo	Suelo
Fecha de muestreo	2020-10-28	2021-02-01	2021-05-03
Hora de inicio de muestreo (h)	08:00	7:00	10:20
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada
Código del Cliente	ALFALFA (A-1)	ALFALFA (A-2)	ALFALFA (A-3)
Código del Laboratorio	21080134	21080135	21080136
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados
Metales			
Cadmio (Cd)	0.05	mg/kg	1.35 1.04 1.00
Mercurio (Hg)	0.1	mg/kg	<0.1 <0.1 <0.1
Plomo (Pb)	0.05	mg/kg	8.48 8.83 8.18

L.D.M.: límite de detección del método.

Resultados de Suelo reportados en base seca.

Lima, 21 de Mayo del 2021.

Quim. César Antonio Poma Pando
GERENTE GENERAL
C.Q.P. N° 719
Servicios Analíticos Generales S.A.C.

EXPERTS
WORKING
FOR YOU

Cod.:FI.005/Version: 02/FE-04/2021

OBSERVACIONES: • Está prohibida la reproducción parcial o total del presente documento a menos que sea bajo la autorización escrita de Servicios Analíticos Generales S.A.C. • Los resultados emitidos en este documento sólo son válidos para las muestras referidas en el presente informe. • Las muestras serán conservadas de acuerdo al período de percibibilidad del parámetro analizado con un máximo de 30 días de haber ingresado las muestras al laboratorio. Luego serán eliminadas. • Para corroborar la AUTENTICIDAD del presente informe comunicarse al correo laboratorio@sagperu.com. • Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables pueden ser procesados de acuerdo a ley.

SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

Laboratorio Av. Naciones Unidas N° 1565 Urb. Chacra Ríos Norte - Lima • Oficinas Administrativas Pasaje Clorinda Matto de Turner N° 2079 - Lima
• Central Telefónica (511) 425-6885 • Web: www.sagperu.com • Contacto Electrónico sagperu@sagperu.com

Página 1 de 1

Anexo M.

Informe de ensayo de la concentración de metales pesados-alfalfa



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO
INTERNATIONAL ACCREDITATION SERVICE, INC. - IAS
CON REGISTRO TL - 829



**INFORME DE ENSAYO N° 154173 - 2021
CON VALOR OFICIAL**

CLIENTE : KARINA SILVA MORI
DOMICILIO LEGAL : JR. DOS DE MAYO NRO. 339 - LAMAS - SAN MARTÍN - LAMAS
SOLICITADO POR : KARINA SILVA MORI
REFERENCIA : TESIS DE POSTGRADO
PROCEDENCIA : TARAPOTO - SAN MARTÍN
FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS : 2020-10-29 / 2021-02-02 / 2021-05-04
FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2020-10-29 AL 2020-10-11-13
FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2021-02-02 AL 2021-02-17
FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2021-05-04 AL 2021-05-20
FECHA(S) DE MUESTREO : 2020-10-28 / 2021-02-01 / 2021-05-03
MUESTREO POR : EL CLIENTE
CONDICIÓN DE LA MUESTRA : LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS SE APLICAN A LA MUESTRA(S) TAL COMO SE RECIBIÓ.

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayo	Método	L.C.	Unidades
Metales: Cadmio, Plomo, Mercurio.	EPA-3050-B (1996) / Method-200.7 Rev. 4.4 EMMC Version (1994). Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils / Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry.	---	mg/kg

L.C.: límite de cuantificación.

II. RESULTADOS:

Producto declarado	Suelo	Suelo	Suelo
Matriz analizada	Suelo	Suelo	Suelo
Fecha de muestreo	2021-10-28	2021-02-01	2021-05-03
Hora de inicio de muestreo (h)	9:45	8:40	11:45
Condiciones de la muestra	Conservada	Conservada	Conservada
Código del Cliente	DIENTE DE LEÓN (DL-1)	DIENTE DE LEÓN (DL-2)	DIENTE DE LEÓN (DL-3)
Código del Laboratorio	21080137	21080138	21080139
Ensayo	L.D.M.	Unidades	Resultados
Metales			
Cadmio (Cd)	0.05	mg/kg	1.57 1.38 1.13
Mercurio (Hg)	0.1	mg/kg	<0.1 <0.1 <0.1
Plomo (Pb)	0.05	mg/kg	8.16 7.92 6.10

L.D.M.: límite de detección del método.

Resultados de Suelo reportados en base seca.

Quim. César Antonio Poma Pando
GERENTE GENERAL
C.Q.P. N° 719
Servicios Analíticos Generales S.A.C.

Lima, 21 de Mayo del 2021.

EXPERTS
WORKING
FOR YOU

Cod. FI 005/Versión: 02/FEB/04/2021

OBSERVACIONES: • Está prohibida la reproducción parcial o total del presente documento a menos que sea bajo la autorización escrita de Servicios Analíticos Generales S.A.C. • Los resultados emitidos en este documento sólo son válidos para las muestras referidas en el presente informe. • Las muestras serán conservadas de acuerdo al periodo de perecibilidad del parámetro analizado con un máximo de 30 días de haber ingresado las muestras al laboratorio. Luego serán eliminadas. • Para corroborar la AUTENTICIDAD del presente informe comunicarse al correo laboratorio@sagperu.com. • Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y las culpables pueden ser procesados de acuerdo a ley.

SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

Laboratorio Av. Naciones Unidas N° 1565 Urb. Chacra Ríos Norte - Lima • Oficinas Administrativas Pasaje Clorinda Matto de Turner N° 2079 - Lima
• Central Telefónica (511) 425-6885 • Web: www.sagperu.com • Contacto Electrónico sagperu@sagperu.com

Página 1 de 1

Anexo N.

Panel fotográfico



Foto 1. Punto de muestreo para la extracción de la muestra de suelo contaminado del botadero



Foto 2. Establecimiento de las unidades experimentales de la muestra testigo



Foto 3. Obtención de la muestra de suelo del testigo



Foto 4. Llenado de la cadena de custodia de la especie *M. sativa*



Foto 5. Disposición de las unidades experimentales del tratamiento *M. sativa*



Foto 6. Actividad de riego de las unidades experimentales de *M. sativa*



Foto 7. Emergencia de las plántulas de la especie *M. sativa*



Foto 8. Obtención de una muestra de suelo del tratamiento *M. sativa*



Foto 9. Obtención de la especie *T. officinale*



Foto 10. Disposición de las unidades experimentales de la especie *T. officinale*



Foto 11. Llenado de la cadena de custodia del tratamiento *T. officinale*



Foto 12. Obtención de una muestra de suelo del tratamiento *T. officinale*



Foto 13. Pesado de la muestra de suelo (5 g)



Foto 14. Tamizado de la muestra de suelo

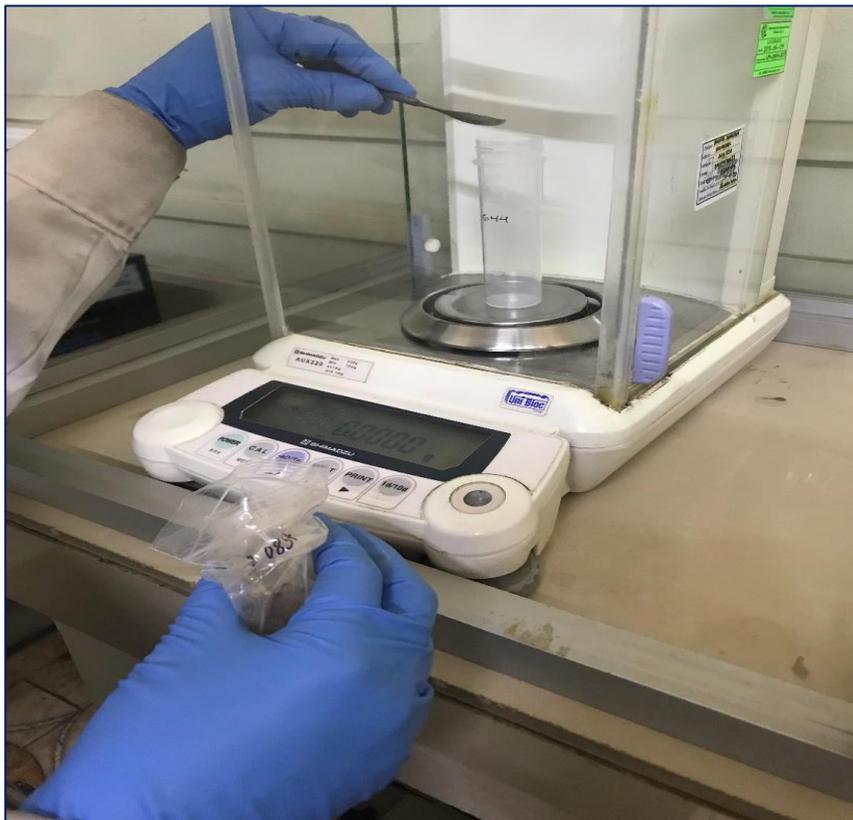


Foto 15. Pesado de la muestra de suelo (0.05 g)



Foto 16. Disposición de los digitubos en la campana de extracción



Foto 17. Adición de la solución de ácido nítrico a las muestras de suelo

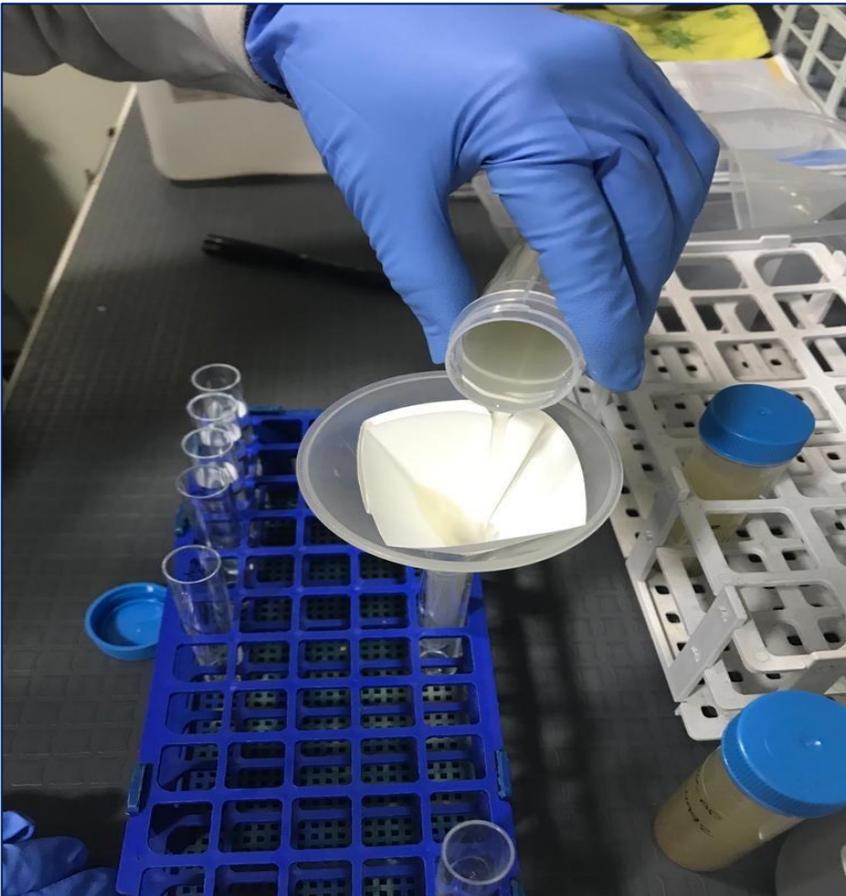


Foto 18. Filtración de las muestras de los digitubos

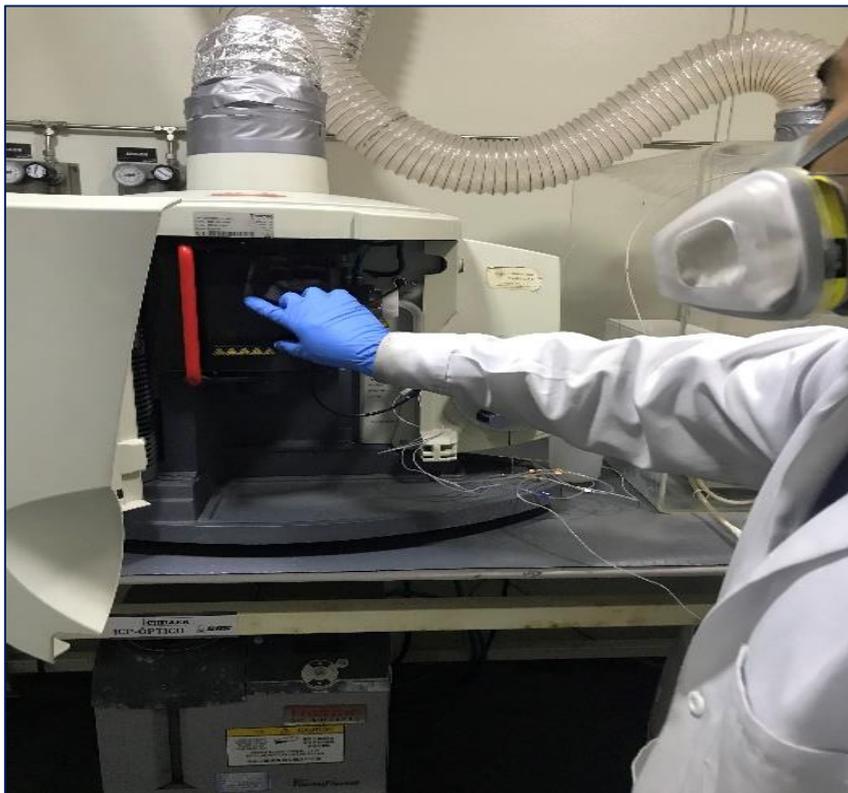


Foto 19. Equipo refrigerante Auto-sampler



Foto 20. Finalización del ensayo de laboratorio