

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Efecto de enmiendas orgánicas en la fitorremediación de
cadmio por coquito (*Cyperus rotundus L.*) en un suelo
contaminado. Sincos, Jauja, 2021**

Luz Milagros Bendezu Montalvan
Carlos Menahim Chavez Gamarra

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2023

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

Tesis

INFORME DE ORIGINALIDAD

24%

INDICE DE SIMILITUD

23%

FUENTES DE INTERNET

9%

PUBLICACIONES

10%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	sinia.minam.gob.pe Fuente de Internet	2%
2	www.revistas.unitru.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	www.secs.com.es Fuente de Internet	1%
4	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	1%
5	López Miguel Edith Alicia. "Remediación de suelos impactados por cadmio", TESIUNAM, 2023 Publicación	1%
6	myslide.es Fuente de Internet	1%
7	Submitted to Universidad Autónoma de Nuevo León Trabajo del estudiante	1%
8	www.grafiati.com Fuente de Internet	1%

9	repositorio.ujcm.edu.pe Fuente de Internet	1 %
10	idoc.pub Fuente de Internet	1 %
11	eprints.uanl.mx Fuente de Internet	1 %
12	repositorio.unasam.edu.pe Fuente de Internet	1 %
13	bibliotecadelagua.sirh.gob.bo Fuente de Internet	1 %
14	rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com Fuente de Internet	1 %
15	repositorio.uap.edu.pe Fuente de Internet	1 %
16	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	1 %
17	digital.csic.es Fuente de Internet	<1 %
18	www.minem.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
19	repositoriodemo.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
20	www.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

21	dokumen.pub Fuente de Internet	<1 %
22	doku.pub Fuente de Internet	<1 %
23	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
24	www.redalyc.org Fuente de Internet	<1 %
25	www.ine.es Fuente de Internet	<1 %
26	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
27	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
28	prezi.com Fuente de Internet	<1 %
29	doczz.cz Fuente de Internet	<1 %
30	www.csic.es Fuente de Internet	<1 %
31	repositorio.untrm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
32	www.geochemie.uni-bremen.de Fuente de Internet	<1 %

33	Submitted to Universidad Del Magdalena Trabajo del estudiante	<1 %
34	Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
35	repositorio.escuelamilitar.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
36	repositorio.upsjb.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
37	www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
38	Submitted to Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas Trabajo del estudiante	<1 %
39	repositorio.upeu.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
40	dehesa.unex.es:8443 Fuente de Internet	<1 %
41	repositorio.unapiquitos.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
42	Submitted to Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco Trabajo del estudiante	<1 %
43	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1 %

44	documentop.com Fuente de Internet	<1 %
45	intra.uigv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
46	apirepositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
47	repositorio.unia.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
48	repositorio.upt.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
49	repositorio.uteq.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
50	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
51	Borbón Palomares Dalia Berenice. "Evaluación del potencial de cinco especies de plantas en la fitoestabilización de los jales mineros abandonados de San Felipe de Jesús, Sonora", TESIUNAM, 2020 Publicación	<1 %
52	Submitted to Universidad Catolica de Trujillo Trabajo del estudiante	<1 %
53	Submitted to Escuela Superior Politécnica del Litoral Trabajo del estudiante	<1 %

54	distancia.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
55	repositorio.unamba.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
56	Navarrete Cisneros María Flor Soledad. "Acumulación de AS, CD, PB y FE en planta de maíz (zea mays) originada por suelos contaminados por jales en Taxco, Guerrero", TESIUNAM, 2012 Publicación	<1 %
57	cybertesis.uni.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
58	www.polodelconocimiento.com Fuente de Internet	<1 %
59	Vallejo Pérez Faviola Daniela. "Análisis comparativo de las técnicas de remediación de suelos contaminados en México", TESIUNAM, 2017 Publicación	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 20 words

Excluir bibliografía

Activo

AGRADECIMIENTOS

Por Luz Milagros Bendezú Montalván:

Agradezco a Dios por otorgarme salud, protegerme y permitir que cumpla mis objetivos en la vida, así mismo, agradezco a mis padres por apoyarme económicamente en el proceso de mi tesis, de igual forma agradezco a mi asesor el Ingeniero Andrés Azabache Leyton, por impartir sus conocimientos con paciencia y ser mi guía académica para la culminación de esta y a mi amigo Johan Abarca Reyes por la motivación constante y la ayuda brindada emocionalmente.

Por Carlos Menahim Chávez Gamarra:

Agradezco infinitamente Dios por darme la vida y guiar mis pasos día a día, agradezco a mis padres que estuvieron ahí presentes en los buenos y malos momentos, por su comprensión y consejos que influenciaron en mi a ser mejor cada día.

Agradezco a mi asesor el Ingeniero Andrés azabache Leyton que me ayudo con las inquietudes durante el desarrollo de esta.

DEDICATORIA

Por Luz Milagros Bendezú Montalvan

Esta tesis se la dedico a mis amados padres, a mi madre Luz Isabel Montalván Apumayta por ser una mujer excepcional que gracias a su cariño, paciencia, comprensión y motivación en momentos difíciles pude lograr terminar mi carrera profesional , es por ello que no solo le dedico mi tesis, si no, le dedico mi futuro a la mujer que me dio la vida y me devolvió la luz en momentos de oscuridad, la que es, fue y será siempre mi mayor motivación para enfrentar las adversidades, también se la dedico a mi Padre Miguel Ronald Bendezú Mendoza quien es mi referente de amor y un pilar muy importante en mi desarrollo personal y profesional para sentirme segura frente a la vida, es quien hizo que desarrollara mi amor en Dios con más fervor y gracias a su perseverancia para difundir la fe en mí, puedo decir que me siento orgullosa del ser humano en que me estoy convirtiendo , no puedo decir que con este logro soy el orgullo de mis padres porque desde que tengo uso de razón me hicieron sentir su mayor orgullo y eso es su primer logro como padres, pero si puedo decir que está empezando el legado “Bendezú Montalván” finalmente se lo dedico a Danny Z.C. Quien es muy especial en mi vida y tengo la fortuna de tener a mi lado a alguien que me regala todos los días un amor genuino y puro.

Por Carlos Menahim Chávez Gamarra

Esta tesis se la dedico a mis amados padres, a mi madre Isabel Zulema Gamarra Tutaya que ha creído en mí siempre dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio; enseñándome a valorar todo lo que tengo. A ella dedico el presente trabajo, porque ha fomentado en mí, el deseo de superación y triunfo en la vida. Lo que ha contribuido a la consecución de este logro. Espero contar siempre con su valioso e incondicional apoyo, A mi padre Carlos Ulises Chávez Leonardo que sé desde el cielo debe de estar orgulloso de las metas que alcanzo, de igual forma a mi familia que siempre me motivo a no rendirme en las dificultades, como también a mi asesor ingeniero Andrés Azabache Leyton, por impartir sus conocimientos a detalle, por la motivación y la comprensión que lo caracteriza, a todo ellos gracias por hacer de mi un instrumento de bien.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	x
CAPÍTULO I : PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Planteamiento y formulación del problema	1
1.1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.1.2 Formulación del problema	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Justificación e importancia	2
1.3.1 Justificación	2
1.3.2 Importancia	3
1.4 Hipótesis y descripción de variables	4
1.4.1 Hipótesis	4
1.4.2 Descripción de variables	4
CAPÍTULO II : MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Antecedentes del problema.....	6
2.1.1 Nacionales	6
2.1.1 Internacionales	8
2.2 Bases teóricas	10
2.2.1 La contaminación del suelo por cadmio.....	10
2.2.2 Reacciones del cadmio en el suelo.....	12
2.2.3 Las enmiendas orgánicas.....	16
2.2.4 Fitorremediación asistida Mecanismos y efectos	18
2.3 Definición de términos básicos.....	19
CAPÍTULO III : METODOLOGÍA.....	21
3.1 Método, y alcance de la investigación.....	21
3.1.1 Método general.....	21
3.1.2 Alcance de la investigación	23

3.2	Nivel de investigación	23
3.3	Diseño de la investigación	23
3.3.1	Diseño experimental.....	23
3.3.2	Procedimiento experimental.....	24
3.4	Población y muestra	27
3.4.1	Población	27
3.4.2	Muestra	27
3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	27
3.5.1	Materia seca de la planta	27
3.5.2	Análisis de cadmio en la planta.....	27
3.5.3	Análisis de cadmio en el suelo después del experimento	27
3.5.4	Cálculo del factor de bioacumulación (FBC).....	27
3.5.5	Cálculo del factor de translocación (FT)	28
3.5.6	Procesamiento de los datos	28
CAPÍTULO IV : RESULTADOS Y DISCUSIÓN		30
4.1	Resultados del tratamiento y análisis de la información.....	30
4.1.1	Contenido de Cd en la parte aérea de <i>Cyperus rotundus</i> L.....	30
4.1.2	Contenido de Cd en raíces.....	31
4.1.3	Contenido de materia seca	31
4.1.4	Factor de bioacumulación (FBC) en la parte aérea.....	33
4.1.5	Factor de translocación (FT)	34
4.1.6	Contenido de Cd en el suelo	35
4.2	Prueba de hipótesis	36
4.2.1	Hipótesis específica 1:.....	36
4.2.2	Hipótesis específica 2.....	42
4.2.3	Hipótesis específica 3.....	49
4.3	Discusión de resultados	51
CONCLUSIONES.....		54
RECOMENDACIONES		55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		56
ANEXOS.....		67
Anexo I. Análisis de suelo		68
Anexo II. Escala de interpretación de análisis de suelos		72
Anexo 3. Galería fotográfica		75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	5
Tabla 2. Contenido de Cd en suelos afectados por actividades industriales (39).	12
Tabla 3. Métodos de análisis utilizados.....	21
Tabla 4. Tratamientos en estudio	24
Tabla 5. Resultados del análisis de caracterización, del suelo del experimento.	25
Tabla 6. Resultados del análisis de Cd en el suelo.	26
Tabla 7. Resultados de la concentración de Cd en la parte aérea (mg.kg-1	30
Tabla 8. Resultados del contenido de Cd en raíces (mg/kg).....	31
Tabla 9. Resultados del peso de materia seca (g) en la parte aérea.....	31
Tabla 10. Resultados del peso de materia seca (g) en la parte radicular.	32
Tabla 11. Resultados del FBC de Cd en la parte aérea	33
Tabla 12. Resultados del FBC de Cd en la parte radicular	33
Tabla 13. Resultados del FBC total de Cd.....	34
Tabla 14. Resultados del FT de Cd.....	34
Tabla 15. Resultados del contenido de Cd en el suelo.	35
Tabla 16. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de Cd (mg/kg) en la parte aérea.....	36
Tabla 17. Análisis de variancia para el contenido de Cd en hojas.	36
Tabla 18. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de Cd en la parte radicular	38
Tabla 19. Prueba de Kruskal Wallis para el contenido de Cd en la parte radicular.....	39
Tabla 20. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido material seca aérea de <i>Cyperus rotundus</i> L	40
Tabla 21. Análisis de variancia para el contenido de materia seca aérea.	40
Tabla 22. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido materia seca radicular de <i>Cyperus rotundus</i> L.	41
Tabla 23. Análisis de variancia para el contenido de materia seca radicular	41
Tabla 24. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido el FBC en la parte aérea.	42
Tabla 25. Análisis de variancia para el FBC en la parte aérea.	43
Tabla 26. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido el FBC en la parte radicular	44
Tabla 27. Análisis de variancia para el FBC en la parte radicular.....	45
Tabla 29. Análisis de variancia para el FBC total.	46

Tabla 30. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FT.....	47
Tabla 31. Análisis de variancia para el FT.	47
Tabla 32. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de Cd en el suelo.	49
Tabla 33. Análisis de variancia para el FBC en hojas.	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Los procesos de fitorremediación y sus funciones asociadas (66).....	16
Figura 2. Fitorremediación asistida, mecanismos y efectos involucrados (66).....	18
Figura 3. Ubicación de la parcela agrícola.....	25
Figura 4. Diagrama metodológico del proceso experimental.	29
Figura 5. Prueba de Duncan para el contenido de Cd en la parte aérea. Las líneas verticales sobre las barras presentan el error típico de cada tratamiento (n=3).....	37
Figura 6. Prueba de Duncan para el FBC en parte aérea.....	43
Figura 7. Prueba de Duncan para el FT.....	48
Figura 8. Prueba de Duncan para el contenido de Cd en el suelo.....	50

RESUMEN

Objetivo: Determinar el efecto de las enmiendas orgánicas en la fitorremediación de cadmio por *Cyperus rotundus* L. en un suelo contaminado de Sincos. *Metodología:* se obtuvo una muestra compuesta de la capa superficial de suelo agrícola, la cual fue analizada en sus propiedades físico química y contenido de Cd. El suelo tuvo un contenido de Cd de 8.77 mg/kg y fue colocado en macetas de cuatro kilogramos de capacidad, donde se aplicaron los siguientes tratamientos: Microorganismos eficaces (EM) al 5%, lombricompost (LC) al 20%, ácido etilen diamino tetraacético (EDTA) al 0.1%, EM+LC, EM+EDTA, LC+EDTA, LC+EM+EDTA, y un tratamiento control, dispuestos en un diseño Completamente al Azar. En cada unidad experimental se trasplantó *Cyperus rotundus* L. Las evaluaciones realizadas fueron: contenido de Cd en la parte aérea y radicular, materia seca aérea y radicular, Factor de Bioconcentración (FBC) de la parte aérea, radicular y total (aérea + radicular), Factor de Traslocación (FT), y contenido de Cd en el suelo, al final del experimento. El tratamiento con LC + EDTA incrementó la concentración de Cd en la parte aérea. El LC incrementó la materia seca aérea. El factor de bioacumulación (FBC) fue superior con el tratamiento EDTA+LC y EDTA+EM. El factor de traslocación (FT) fue mayor que 1 en todos los tratamientos. Fue el LC el que redujo significativamente la concentración de Cd en el suelo de Sincos, logrando un 35.35% de reducción de este metal pesado. No se encontró diferencias significativas en la concentración de Cd en la raíz, materia seca radicular, FBC en raíces y total.

Palabras clave: fitorremediación, cadmio, contaminación, *Cyperus rotundus* L., enmiendas orgánicas.

ABSTRACT

Objective: To determine the effect of organic amendments in the phytoremediation of cadmium by *Cyperus rotundus* L. in a contaminated soil of Sincos. Methodology: a composite sample of the surface layer of agricultural soil was obtained, which was analyzed for its physical chemical properties and Cd content. The soil had a Cd content of 8.77 mg/kg and was placed in four kg pots. capacity, where the following treatments were applied: Effective microorganisms (EM) at 5%, vermicompost (LC) at 20%, ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA) at 0.1%, EM+LC, EM+EDTA, LC+EDTA, LC+EM+EDTA, and a control treatment, arranged in a Completely Randomized design. *Cyperus rotundus* L. was transplanted in each experimental unit. The evaluations carried out were: Cd content in the aerial and root parts, aerial and root dry matter, Bioconcentration Factor (BCF) of the aerial, root and total parts (aerial + root), Translocation Factor (TF), and Cd content in the soil, at the end of the experiment. The treatment with LC + EDTA increased the concentration of Cd in the aerial part. LC increased aerial dry matter. The bioaccumulation factor (BCF) was higher with the EDTA+LC and EDTA+EM treatments. The translocation factor (TF) was greater than 1 in all treatments. It was the LC that significantly reduced the concentration of Cd in the Sincos soil, achieving a 35.35% reduction of this heavy metal. There was no statistical significance for root Cd, root dry matter, root BCF and total.

Keys words: phytoremediation, cadmium, contamination, *Cyperus rotundus* L., organic amendments.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo por metales pesados es un tema de interés actual para nuestra sociedad, debido a su efecto negativo en la salud humana y en la diversidad de organismos (1). Estos contaminantes inorgánicos necesitan especial atención porque no son degradables, se concentran en el suelo y pueden permanecer mucho tiempo, lo cual facilita su relación con las cadenas tróficas.

El cadmio es un metal que está ampliamente distribuido en el ambiente. Sus concentraciones elevadas en el suelo provienen de diferentes fuentes y es cancerígeno para los humanos (2).

Las técnicas de remediación para suelos contaminados con metales pesados, tienen diferentes alternativas, que serán viables en función de las características del suelo y el tipo de contaminante, como por ejemplo la excavación, fijación, lavado, electroremediación, solidificación, entre otras. Una de las alternativas, es la fitorremediación, debido a que tiene un mínimo impacto sobre el ambiente y el suelo, además de su bajo costo. La efectividad de esta técnica va a depender de la disponibilidad de los metales pesados en el suelo.

La fitorremediación es una técnica natural que tiene resultados a largo plazo para los elementos que contaminan el suelo y lograr su descontaminación (3). Considerando que los suelos contaminados tienen variabilidad y limitaciones en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, lo cual influye en el desarrollo y crecimiento de las plantas y la absorción de metales pesados, la aplicación de enmiendas e introducción de microorganismos se constituye en una alternativa para favorecer la fitorremediación.

El presente trabajo consta de cuatro capítulos; el Capítulo I, comprende la caracterización y planteamiento del problema, los objetivos del estudio, las variables en estudio y su operacionalización. El Capítulo II, incluye el marco teórico donde se reportan los antecedentes nacionales e internacionales y las bases teóricas, fundamentadas en la contaminación del suelo, comportamiento del Cd, la fitorremediación, características de la planta de *C. rotundus* la definición de términos básicos. El Capítulo III comprende la metodología donde se detallan el método y alcance de la investigación, diseño utilizado, y técnicas e instrumentos de recolección de datos. El Capítulo IV reporta los resultados y discusión, validado con las pruebas estadísticas, y su discusión con base en los antecedentes reportados. Seguidamente se presentan las conclusiones del trabajo, basado en los objetivos y las recomendaciones derivadas de este trabajo de investigación.

CAPÍTULO I : PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

La sociedad moderna se caracteriza por la creciente emisión al ambiente de compuestos contaminantes, las cuales provienen de las actividades industriales, mineras, agropecuarias, artesanales y domésticas. Estos compuestos constituyen una amenaza para los seres vivos, por lo que se tienen diferentes métodos para remediar el daño causado. Los métodos convencionales son muy costosos y afectan, en algún grado, de manera irreversible las propiedades de los recursos suelo y agua, y a los seres vivos (4).

Los tratamientos físico – químicos son costosos, con limitaciones en su eficacia; esto ha estimulado el desarrollo de nuevas tecnologías. Una alternativa sustentable es la fitorremediación, y es de bajo costo para la rehabilitación de ambientes afectados por contaminantes antropogénicos y naturales (5).

La fitorremediación es una tecnología cuyo objetivo principal es la eliminación de metales tóxicos y contaminantes orgánicos en el suelo, aire, agua y sedimentos, que afectan a los seres vivos, sin embargo, es necesario seguir investigando sobre los procesos que determinan la disponibilidad de los contaminantes, su absorción, traslocación, quelación, degradación y volatilización en la planta, con el fin de lograr la eficiencia de remediación (6).

El proceso de fitorremediación puede optimizarse de diferentes maneras, lo cual dependerá del contaminante a tratar. En el caso de metales pesados, la fitorremediación puede ser más eficiente cuando se incrementa la biodisponibilidad del metal por la adición de agentes quelantes o extractantes, que forman complejos solubles fácilmente asimilados por las plantas. Se conoce que los mecanismos de tolerancia son diferentes entre las diferentes especies de plantas y están determinadas por el tipo de metal. Como parte de sus estrategias de resistencia o de detoxificación, las plantas pueden excluir, mineralizar, reducir, solubilizar, quelar o acomplejar, redistribuir y acumular metales (7).

La estabilización química de elementos potencialmente tóxicos a través de enmiendas se ha considerado como una alternativa viable y económica para la remediación de suelos contaminados. Su objetivo es reducir la disponibilidad y movilidad de los contaminantes en el suelo. Las enmiendas aceleran los procesos de inmovilización que incluyen: sorción, precipitación, complejación y reacciones redox (8).

La recuperación de suelos contaminados, utilizando la fitorremediación, se constituye

en una alternativa para los suelos contaminados del valle del Mantaro, irrigados con aguas del río del mismo nombre, por lo que se propone investigar el efecto de enmiendas orgánicas que asistan la fitorremediación, debido a su efecto sobre los metales pesados contaminantes del suelo.

1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1 Problema general

¿Cuál es el efecto de enmiendas orgánicas en la fitorremediación de cadmio con *Cyperus rotundus* L. en un suelo contaminado en Sincos?

1.1.2.2 Problemas específicos

¿Cuál es el efecto del EM, lombricompost y EDTA en la absorción de cadmio y formación de materia seca, por *Cyperus rotundus* L.?

¿En qué medida el EM, lombricompost y EDTA influyen en los factores de bioacumulación y translocación de cadmio en *Cyperus rotundus* L.

¿Cuál es la concentración de Cadmio total en el suelo de Sincos, al final del proceso de fitorremediación?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar el efecto de las enmiendas orgánicas en la fitorremediación de cadmio por *Cyperus rotundus* L. en un suelo contaminado de Sincos.

1.2.2 Objetivos específicos

Medir el efecto del EM, lombricompost y EDTA en la concentración de Cd y formación de materia seca en la parte aérea y radicular *Cyperus rotundus* L.

Calcular los factores de bioacumulación y traslocación en *Cyperus rotundus* L.

Evaluar la concentración de Cd total en el suelo, al final del proceso de fitorremediación por *Cyperus rotundus* L.

1.3 Justificación e importancia

1.3.1 Justificación

1.3.1.1 Teórica

La técnica de fitorremediación es específica para cada tipo de suelo contaminado y para cada especie de planta, por lo que la utilización de enmiendas, como el EM, el lombricompost y el EDTA pueden facilitar la fitorremediación, lo cual permitirá obtener información de la cantidad de metal absorbido por *Cyperus rotundus* L. y calificarla como

fitoestabilizadora o fitoextractora, a través de sus indicadores de bioacumulación, translocación, formación de materia seca y contenido final en el suelo; para determinar el potencial de esta especie en la remediación de suelos contaminados con cadmio.

1.3.1.2 Metodológica

La fitorremediación de suelos contaminados, utilizando especies vegetales, consideradas malezas, como es el caso de *Cyperus rotundus* L., debe ser evaluada en función de los indicadores de acumulación en la planta, del contaminante proveniente del suelo, así como el transporte desde la raíz hacia la parte aérea, como son los factores de bioacumulación y de traslocación en un experimento ex situ, asistidos por la presencia de enmiendas orgánicas que favorecen la actividad microbial y condicionan al suelo para una efectiva absorción de contaminantes por la planta. Estos resultaron permitirán incrementar la información de remediación de suelos contaminados, con fines de enseñanza y planteamiento de otras investigaciones.

1.3.1.3 Práctica

La remediación de suelos con técnicas que no alteren el ambiente como lo es la fitorremediación, se constituye en una alternativa económica y que no afecta el ambiente, es decir, suelo, agua y aire; en la medida que se validen los resultados de la medición de sus indicadores y niveles de descontaminación de suelos, en el distrito de Sincos; pues estos suelos mayormente se utilizan en la actividad agropecuaria, donde prosperan especies de diferente tipo como la maleza denominada “coquito” (*Cyperus rotundus* L.), cuya información servirá para precisar el carácter fitorremediador de esta especie. La aplicación de enmiendas orgánicas se constituye en una técnica auxiliar, pero que es una práctica agrícola normal que se realiza como parte del manejo del suelo, con el fin de mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo, para el crecimiento de las plantas cultivadas y que indirectamente influyen en el crecimiento de las malezas presentes en los suelos.

1.3.2 Importancia

El tema de fitorremediación es y seguirá siendo significativa en la medida que se identifiquen y validen los resultados de su aplicación, utilizando diferentes especies vegetales en suelos contaminados con metales pesados. La agregación de enmiendas orgánicas se hace necesaria por el carácter limitante de las propiedades de los suelos contaminados del distrito de Sincos, que tiene contenidos medios a bajos de materia orgánica, y como componente esencial del suelo transforma nutrientes y condiciona favorablemente el suelo para el crecimiento de las plantas. Además, las malezas que prosperan en estos suelos, como el “C. rotundus”, requieren evaluarse en su potencial fitorremediador de metales pesados, como el cadmio.

1.4 Hipótesis y descripción de variables

1.4.1 Hipótesis

1.4.1.1 Hipótesis general

Las enmiendas orgánicas incrementarán significativamente la fitorremediación de cadmio por *Cyperus rotundus L.* en un suelo contaminado de Sincos.

1.4.1.2 Hipótesis específicas

Los EM, el lombricompost y el EDTA incrementarán la absorción de cadmio y formación de materia seca, en *Cyperus rotundus L.*, en un suelo contaminado de Sincos.

Los factores de bioacumulación y de translocación de cadmio en *Cyperus rotundus L.* serán afectados significativamente debido a la aplicación de EM, lombricompost y EDTA en un suelo contaminado de Sincos.

La concentración de cadmio en el suelo disminuirá significativamente debido al proceso de fitorremediación.

1.4.2 Descripción de variables

Variable independiente:

X = Enmiendas orgánicas

Indicadores:

- EM
- Lombricompost
- EDTA

Variable dependiente:

Y = Fitorremediación

Indicadores:

- Concentración de Cd en planta
- Factor de bioacumulación
- Factor de translocación
- Materia seca
- Contenido de Cd en el suelo

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	
INDEPENDIENTE	X1 = Enmiendas orgánicas	Las enmiendas son materiales que se incorporan al suelo para mejorar su calidad y sus propiedades. Las de tipo orgánico tienen como objetivo principal aumentar la materia orgánica y mejorar la estructura, porosidad, retención de humedad, etc. Se mencionan al compost, vermicompost, quelatos (EDTA) y microorganismos eficaces (9).	%	Microorganismos Eficaces (EM) Lombricompost EDTA
	Fitorremediación (<i>Cyperus rotundus L.</i>)	El coquito (<i>Cyperus rotundus L.</i>) es una maleza reconocida en todo el mundo. Esta Ciperácea es de origen asiático (India) y se encuentra distribuida en el trópico y subtropico. Se propaga vegetativamente, es de fisiología C4 y sobrevive a condiciones extremas de altas temperaturas, sequía, anegamiento y falta de aireación (10).	mg/kg Relación %	Cd en planta Cd en suelo -FBC FT Materia seca

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II : MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

2.1.1 Nacionales

En el trabajo de tesis titulado: “Determinación de la capacidad fitorremediadora de *Lupinus mutabilis* Sweet “chocho o tarwui” en suelos contaminados con cadmio (Cd)”, se tuvo como objetivo evidenciar la capacidad fitorremediadora de *Lupinus mutabilis* Sweet “choco o tarwui” en suelos contaminados con cadmio, mediante el análisis de distribución del contaminante en los diferentes órganos de la planta. El sustrato fue arena de cuarzo lavada, en una cantidad de 6 kg por unidad experimental, donde se agregó 0, 4, 8, 12 y 16 mg SO₄Cd/L a cada unidad experimental. El experimento tuvo una duración de 65 días. Se determinó una reducida capacidad fitorremediadora de *Lupinus mutabilis* Sweet, alcanzando una acumulación de cadmio en los órganos de la planta, en un rango de 44.75 y 11 mg Cd/kg. La acumulación de cadmio es mayor en las raíces con 3.13 mg/kg, seguido de los tallos con 0.15 mg/kg y folíolos con 0.13 mg/kg. En el sustrato disminuyó la concentración de Cd, de 16 a 12.59 mg/kg. El índice de tolerancia de *Lupinus mutabilis* Sweet disminuyó con el incremento de la concentración de cadmio (11).

En el trabajo de tesis titulado: “Fitorremediación con especies nativas en suelos contaminados por plomo”, se tuvo como objetivo general determinar la capacidad fitorremediadora de especies de flora nativa encontradas en zonas de contaminación por plomo, esto debido a que su uso sería el más adecuado por haber desarrollado mecanismos de tolerancia al metal. Se recolectaron 37 muestras vegetales de 12 lugares en la ciudad de La Oroya y el lago Junín, lugares con pasivos mineros, seleccionando 2 especies de los géneros *Calamagrostis* y *Nicotiana* para ser cultivadas con 3 niveles de plomo: 700, 1000 y 1200 ppm; se cultivó adicionalmente *Vetiveria zizanioides* con fines de comparación. El ensayo se realizó en invernadero con un diseño experimental completamente al Azar con arreglo factorial durante 60 días en la Universidad Nacional Agraria La Molina. Se concluyó que *Nicotiana* tiene el mejor potencial de fitorremediación para el desarrollo de la biomasa aérea, elevada concentración de Pb (276.7 ppm en zona radicular y 96.5 ppm en zona aérea), extracción del metal del suelo (0.3 ppm Pb), capacidad natural de translocar el metal a la parte aérea e inmovilización del metal en la raíz (Factor de translocación = 0.39) y a su buena adaptación a otras condiciones climática (12).

En el trabajo de tesis titulado: “Capacidad fitorremediadora de la especie *Helianthus annuus* mediante la incorporación de enmiendas a suelos contaminados por metales pesados (Plomo, Cromo) de industrias metalmeccánicas”, se tuvo como objetivo general la capacidad fitorremediadora de *Helianthus annuus* mediante la incorporación de guano de isla a suelos de industrias metalmeccánicas contaminados con cromo y plomo. Se utilizó semillas de 95% de poder germinativo. Se trabajó con 4 tratamientos, cada uno con tres repeticiones, haciendo un total de 12 unidades experimentales, conducido durante 60 días, en el vivero de la Universidad Peruana Unión. Los tratamientos consisten en 100 % de suelo contaminado (T1), 85 % de suelos contaminado + 10 % de suelos agrícola + 5 % de guano de isla (T2), 70% de suelos contaminado + 25 % de suelos agrícola + 5 % de guano de isla (T3), y 55% de suelos contaminado + 40% de suelos agrícola + 5% de guano de isla (T4), dispuestos en un diseño completamente al azar. Se concluyó que *Helianthus annuus* posee capacidad fitorremediadora, debido a que bioacumula Pb y Cr en la masa foliar de todos los tratamientos, sobresaliendo los tratamientos T3 y T4; de esta manera reduce la concentración de metal pesado en el suelo. Asimismo, los tratamientos T3 y T4 lograron mayor crecimiento vegetal y mayor porcentaje de supervivencia (13).

En el trabajo de tesis titulado: “Evaluación de *Lupinus condensiflorus* C.P.Sm., *L. Ballianus* C.P. Sm. y *Astragalus garbancillo* Cav. (Fabaceae) en la restauración de suelos que contiene plomo, cadmio y zinc”, se tuvo como objetivos conocer la viabilidad de las semillas y evaluar el desarrollo de *Lupinus condensiflorus*, *L. Ballianus* y *Astragalus garbancillo* en suelos contaminados con cadmio, plomo y zinc y el uso potencial de estas especies en la restauración de estos suelos. El ensayo se realizó en invernadero en Lachaqui, Canta, Lima, y en el laboratorio de Fitología Aplicada de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. El desarrollo de las tres especies vegetales fue evaluado en 12 tratamientos de relave de mina en un diseño completo al azar en arreglo factorial 3 x 4, con 5 repeticiones por tratamiento. Los mayores valores de acumulación de cadmio total, plomo total, zinc total; y el contenido de estos metales en las raíces de *Lupinus ballianus*, *L. condensiflorus* y en *Astragalus garbancillo*, fueron obtenidos con el tratamiento de 100% de relave de mina. El factor de bioconcentración de cadmio en las tres especies fue > 1. Pero, el factor de bioconcentración y de transferencia de plomo y zinc en las tres especies fue < 1, en conclusión, las tres especies son fitoestabilizadores de metales pesados (14).

En el trabajo de investigación titulado: “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” se tuvo como objetivos

específicos verificarla bioconcentración de metales pesados en la planta Yaluzai en el distrito Simón Bolívar de Rancas, distrito de Pasco. El área total de estudio fue de 115 hectáreas de la relavera, y la muestra se tomó en un área de 9 m². La especie vegetal fue identificada in situ y se monitoreó su crecimiento por un periodo de 9 meses, después de lo cual se analizó hojas y raíces. Se concluyó que la especie evaluada es bioacumuladora de los siguientes metales: Fe, Cu, Pb y Zn (15).

En el trabajo de investigación titulado: “Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados mediante cultivo de geranio (*Pelargonium zonale*)”, se tuvo como objetivo evaluar la capacidad del geranio en remover metales como AS, Cd y Cu de suelos contaminados. La muestra de suelo utilizada para el experimento provino del botadero El Milagro, distrito de Trujillo. Se observó una tolerancia significativa del geranio al As, con una disminución significativa hasta de 74% con respecto al nivel inicial, mientras que, para Cd y Cu, se logró disminuciones de hasta 79 y 55%, respectivamente. Esto demostró que la técnica de fitorremediación es una alternativa para la recuperación de ecosistemas contaminados con metales pesados (16).

2.1.1 Internacionales

En el artículo de investigación titulado: “Efecto de la aplicación de dos sustancias quelantes (EDTA y DTPA) sobre la vegetación autóctona en un suelo contaminado de Cu, Zn y Cd”, se hipotetizó que la adición de sustancias quelantes es útil para la remediación de suelos con suficiente materia orgánica y altas concentraciones de metales pesados, pero se desconoce la influencia sobre las comunidades vegetales asentadas en estos suelos, o sobre su banco de semillas. Se comparó el efecto de dos quelatos: EDTA y DTPA, sobre una comunidad de pastizal húmedo afectada por el emplazamiento de la mina abandonada “Fernandito” (Garganta de los Montes, Madrid). Durante seis meses se condujo el experimento de bioensayo de microcosmos con la capa superficial del suelo de este pasto, con su banco de semillas y altos niveles de contaminación de cobre (1120 ppm), zinc (190 ppm) y cadmio (15 ppm). Los tratamientos fueron: suelo sin enmienda (control), suelo con 1 g EDTA / kg de suelo y suelo con 1 g DTPA / kg de suelo. Los quelatos no tuvieron efecto negativo sobre las plantas *Corrigiola telephifolia* y *Agrostis castellana*, e incrementaron significativamente la cantidad de cobre acumulada en raíces y partes aéreas, pero si mostraron ciertos desequilibrios nutricionales. La cantidad de metales acumulados en partes aéreas y raíces resultó menor en el caso de DTPA que en el EDTA (17).

En el trabajo de investigación titulado: “Recuperación y rehabilitación de suelos contaminados con elementos traza mediante la aplicación de enmiendas y el establecimiento de una cubierta vegetal natural o de una planta de crecimiento rápido

(*Paulownia fortunei*)”, se tuvo como objetivo estudiar el efecto de enmiendas en las propiedades químicas y bioquímicas de suelos contaminados con elementos traza y el crecimiento de vegetación. Se desarrollaron dos experimentos durante dos años consecutivos, uno en campo y otro en contenedores. Los tratamientos fueron tres enmiendas: espuma de azucarera (10 t/ha), compost de biosólido (30 t/ha) y mezcla de leonardita y espuma de azucarera (25 t/ha), y un tratamiento control, sin enmienda, dispuestos en un diseño de bloques completos al azar. Se concluyó que la aplicación de enmiendas en el suelo ácido contaminado con elementos traza disminuyó la disponibilidad de los contaminantes, atribuible a la presencia de la planta, y a la vez que aumenta la fertilidad química del suelo, lo que coadyuvó a la colonización por especies vegetales espontáneas de las parcelas contaminadas (18).

En el trabajo de investigación titulado: “Evaluation of the cadmium phytoextraction potential of tobacco (*Nicotiana tabacum*) and rhizosphere micro-characteristics under different cadmium levels”, se tuvo como objetivo evaluar en campo la eficiencia de remediación del tabaco en un suelo contaminado con diferentes niveles de Cd y explorar las micro características de la rizósfera. Los resultados indicaron que el tabaco podría remover 12.9% del Cd del suelo en un periodo de 80 días. El experimento en macetas reveló que el tabaco podría tolerar concentraciones de 5.8 g/kg en el suelo y bioacumular 68.1 mg Cd y 40.8 mg Cd en tallos y raíces, respectivamente. La alta acumulación de Cd se atribuyó a la fuerte acidez en la rizósfera del suelo y el incremento de la biodisponibilidad de Cd. Las rizobacterias no parecen estar involucradas en la movilidad del Cd. Al contrario, el tabaco tiende a enriquecer bacterias que reducen sulfato en condiciones de alto Cd en el suelo y enriquecen bacterias promotoras de crecimiento en condiciones de baja concentración de Cd, sugiriendo que el tabaco emplea diferentes microorganismos para responder al exceso de Cd, lo cual ayuda a clarificar los mecanismos de la rizosfera en la movilización y tolerancia de Cd (19).

En el artículo de investigación titulado: “The Cd phytoextraction potential of hyperaccumulator *Sedum alfredii*-oilseed rape intercropping system under different soil types and comprehensive benefits evaluation under field conditions”, tuvo como objetivo evaluar los efectos del cultivo intercalado de *Sedum alfredii* (planta hiperacumuladora) y colza sobre la producción del cultivo, y potencial de fitoextracción y transporte de Cd, así como establecer una marco de evaluación sobre sus beneficios en suelos contaminados. Comparado con el monocultivo de colza, el cultivo intercalado con *S. alfredii* incrementó significativamente la biomasa, rendimiento de semilla y acumulación de Cd en colza en cinco tipos de suelo. Las acumulaciones de Cd variaron de 22.8 a

4000 μ g/maceta. El análisis de regresión mostró que la concentración de Cd en planta estuvo relacionada con P, pH, materia orgánica, K, limo y arena. Un ensayo adicional de campo mostró que el cultivo intercalado podría favorecer la fitoextracción de Cd. Este sistema presentó un alto potencial de fitoextracción de Cd en suelos de moderada a baja contaminación de Cd (20).

En el trabajo de investigación titulado: "Phytoextraction of metal(loid)s from contaminated soils by six plant species: A field study" se tuvo como objetivo evaluar y comparar la fitoextracción de *Solanum nigrum* L., *Bidens pilosa* L., *Xanthium strumarium* L., *Helianthus annuus* L., *Lonicera japónica* T., and *Pennisetum sinense* R., sus efectos en la rizosfera y variaciones en la biodiversidad del suelo contaminado con Cd, Pb, As y Zn. Después de dos años de experimentos de campo, *B. pilosa* L. y *X. strumarium* L. exhibieron la más alta fitoextracción y la mayor biomasa aérea. La concentración de Pb, Cd y Zn disminuyó de las seis especies hiper acumuladoras. Además, estas especies vegetales mejoraron y reconstruyeron la estructura de la comunidad bacteriana en los suelos contaminados, debido a los cambios en las propiedades físico químicas del suelo. Se concluyó que la reconstrucción de la comunidad microbiana del suelo puede ayudar a adaptarse a las especies hiper acumuladoras en suelos contaminados con metales y mejorar sus habilidades de fitoextracción (21).

En el artículo de investigación titulado: "EDTA and organic acids assisted phytoextraction of Cd and Zn from a smelter contaminated soil by potherb mustard (*Brassica juncea*, Coss) and evaluation of this bioindicators", se tuvo como objetivo evaluar la posibilidad de recuperar suelos contaminados de fundiciones mediante la fitorremediación asistida donde se aplicó mostaza aromática. Se utilizaron diferentes niveles de EDTA solo y combinado con ácido cítrico y ácido oxálico más un control en un experimento de macetas. Los quelatos se agregaron 25 y 35 días después de la siembra incrementando la disponibilidad de Cd y Zn en el suelo debido a la complejación. La concentración de Cd y Zn fueron incrementados en tallo y raíz, pero el peso seco disminuyó, respecto al control. La toxicidad inducida por los metales potencialmente tóxicos impuso una serie de respuestas biológicas. Los factores de bioacumulación para Cd y Zn y de traslocación para Cd fueron elevados. En general la fitorremediación asistida con quelatos en suelos contaminados por fundiciones fue efectiva en este estudio, en el siguiente orden: EDTA > EDTA+ácido cítrico \square EDTA+ácido oxálico > control (22).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 La contaminación del suelo por cadmio

El cadmio (Cd) es uno de los elementos más móviles y tóxicos en el ambiente (23). Puede reemplazar al calcio en los minerales debido a su similar radio iónico, carga idéntica y similar comportamiento químico (24). Por lo tanto, el Cd ingresa al cuerpo humano y se acumula en los órganos en niveles altos (25).

En el agua del suelo el Cd se presenta en concentraciones de 5 µg/L (26) y hasta 1 µg/L en la napa freática, por ejemplo, en el agua subterránea de Pakistán, la concentración promedio de Cd en rocas sedimentarias unidas a sulfuros, del Jurásico, se encontró un promedio de 10 µg/L (27).

La concentración de Cd en el suelo está cercanamente relacionado a su abundancia en el material parental, así como a su incorporación a través de la deposición atmosférica. Actividades agrícolas e industriales, en balance con las pérdidas a través de lixiviación, erosión y cosecha de los cultivos (28).

En suelos no contaminados, alrededor del mundo, la concentración promedio en el suelo es de 0.36 mg/kg, aunque puede variar entre continentes, países y tipos de suelo. Por ejemplo, las concentraciones promedio son: 0.27 mg/kg en USA (n = 3045), 0.01 mg/kg en Australia, 0.18 en Brasil, 0.3 mg/kg en Japón, 0.2 mg/kg en Europa. En Europa, las concentraciones de Cd son 0.3 a 1 mg/kg en Alemania (n = 2947), 0.6 a 0.7 mg/kg en el Reino Unido (n = 5692), y 0.5 mg/kg en los Países Bajos (n = 708) (29).

El contenido de Cd en los suelos, sin embargo, generalmente disminuye con la profundidad. Al relacionar el contenido de Cd con las propiedades y tipos de suelo, se observó que depende la textura del suelo; hallándose que el promedio alto de Cd puede hallarse en suelos con mayor contenido de arcilla y turba (30).

El contenido de Cd sobre 1.4 mg/kg indica suelos contaminado (31). Las gradientes de concentración son comunes en los suelos, donde se incrementa con la menor distancia a instalaciones industriales, carreteras y áreas urbanas (32). Esto es comparable a lo reportado en suelos de Francia donde se observó una gradiente de antropización de concentraciones de Cd respecto al uso de la tierra, es decir, forestal (0.13 mg/kg) < huertas y viñedos (0.18 mg/kg) < praderas (0.19 mg/kg) < tierras agrícolas (0.24 mg/kg) < jardines (0.34 mg/kg) < áreas urbanas, industriales, militares, mineras y agrícolas (1.30 mg/kg) (33).

Las entradas antropogénicas al suelo son las emisiones de combustión, lodos de depuradora, vertederos, el tránsito vehicular, la industria metálica, minería y accidentes.

Una razón común de las elevadas concentraciones de Cd en el suelo es el uso de fertilizantes fosfatados, que contienen Cd como una impureza. Esta información ha sido confirmada por investigaciones en Estados Unidos, Canadá, Gran Bretaña, Noruega,

Suecia, Finlandia, Dinamarca, Alemania, Australia, y Nueva Zelanda (34).

Los estudios sugieren que la aplicación de fertilizantes fosfatados cambia la química del suelo. Adicionalmente, el Cd puede ser potencialmente transferido a los canales alimenticios y ser tóxico a la biota. Las fuentes de Cd pueden ser de carácter local o difuso (35). Las fuentes locales como las minas, lugares industriales u depósitos de minas abandonadas conducen a elevadas concentraciones, sin embargo, bajo una escala espacial pequeña (36). Las emisiones atmosféricas, reúso de aguas tratadas o actividades agrícolas pueden servir como una fuente difusa causando una mayor distribución de Cd en el ambiente (37).

El rango de contribución de fuentes de contaminación a la cantidad de Cd presente en los suelos que está disponible para el lixiviado a la napa freática. Es 10 a 25% del estiércol de animales, 15 a 50% de la deposición atmosférica, 30 a 55% de los fertilizantes minerales y 2 a 5% de los lodos y compost (38).

Tabla 2. Contenido de Cd en suelos afectados por actividades industriales (39).

Fuente	Contenido de Cadmio	
	Promedio (mg/kg)	Máximo (mg/kg)
Industria minera y metálica	37.6	289
Producción de fertilizantes, productos químicos y petróleo	0.51	2.13
Textiles	42.0	83.6
Cuero	0.63	1.26
Productos minerales no metálicos	25.8	72.0

2.2.2 Reacciones del cadmio en el suelo

La fracción ambientalmente móvil de Cd consiste en Cd soluble en agua, Cd adsorbido no específicamente, y complejos organometálicos (40). La fase adsorbida consiste en Cd enlazado a superficies minerales o complejos organometálicos enlazados débilmente. La fracción estable de Cd está asociada con la matriz del suelo o enlazada a complejos superficiales en óxidos e hidróxidos, materia orgánica, silicatos, sulfuros y otros minerales estables (41).

Además, el Cd es el único metal pesado con afinidad por la fracción fácilmente solubilizada en los típicos protocolos de extracción secuencial de la fase sólida (42). La

fracción incluye Cd soluble en agua, componentes solubles en ácido e intercambiables, y que constituye el contenido de Cd disponible. Usualmente este Cd es introducido artificialmente por deposición; mientras que, el Cd originado de materiales geogénicos está típicamente presente en la fracción insoluble residual (43).

El Cd presente en los minerales de sulfuro o enlazados a materiales orgánicos es generalmente liberado cuando las condiciones redox cambian de reducido a oxidado, este cambio generalmente causa que los minerales de sulfuro se disuelvan y la materia orgánica se mineralice (44).

Los grupos funcionales carboxil y fenol son abundantes en la materia orgánica, sin embargo, los grupos menos abundantes, como los tiol y aminas forman complejos estables con Cd en la materia orgánica disuelta y la materia orgánica del suelo (45).

El azufre orgánico reducido, que consiste en tiols, es frecuentemente la parte de la fracción hidrofílica del Carbono Orgánico Disuelto. Esta fracción es más móvil que la fracción hidrofóbica en el contexto de retención adsorptiva débil, En contraste al Cd, la mayoría de los metales pesados forma complejos con la fracción hidrofóbica menos móvil (46). Además, el Cd tiene una selectividad diferente que otros metales pesados, debido a que forma principalmente complejos con la fracción de materia orgánica disuelta neutra, mientras que otros metales pesados están enlazados a las fracciones hidrofóbicas ácidas y materia orgánica disuelta hidrofílica ácida (47).

Los parámetros más importantes que controlan la solubilidad y movilidad de Cd en ambientes acuáticos son el pH, concentración de carbono orgánico e inorgánico disuelto, y la presencia de arcilla y óxidos e hidróxidos de Fe, Mn y Al (48). Hay una correlación entre el coeficiente de distribución K_d de Cd y los siguientes parámetros: pH > capacidad de intercambio catiónico > óxidos – hidróxidos > arcilla > materia orgánica (49). Además, la adsorción de Cd disminuye con el incremento de la fuerza iónica debido a la competencia con otros cationes, disminuyendo la actividad de Cd^{+2} , formación de complejos o pares iónicos con baja afinidad de adsorción, bajo pH y cambios en el potencial electrostático (40).

2.1.2 La fitorremediación

La técnica de fitorremediación utiliza plantas para remediar suelos contaminados. Es una técnica económica y ambientalmente favorable y utiliza plantas verdes para contener, secuestrar o detoxificar contaminantes del suelo contaminado (50).

La fitorremediación utiliza muchos mecanismos incluyendo degradación (rizodegradación, fitodegradación), acumulación (fitoextracción, rizofiltración), disipación (fitovolatilización), e inmovilización (control hidráulico y fitoestabilización) para

degradar, remover, o inmovilizar los contaminantes (51).

Las especies de plantas ideales para el propósito de fitorremediación debe ser naturalmente resistentes, productoras de gran cantidad de biomasa, tolerante a efectos tóxicos de metales, fáciles de cultivar, alta capacidad de absorción, y no ser atractivas para los herbívoros (52).

Es aún deficiente la información integral de como maximizar la contribución de cada mecanismo de fitorremediación mediante la selección apropiada de plantas y formas para favorecer el éxito de esta tecnología. Recientes artículos sugieren la necesidad de información sobre la factibilidad de la fitorremediación y las ayudas o asistencias que pueden mejorar este fito proceso (53).

Las plantas pueden remover contaminantes orgánicos e inorgánicos desde el suelo usando diferentes mecanismos dependiendo de la especie de planta y las condiciones ambientales (54). Las interacciones de plantas con el sistema suelo y los microorganismos juegan un rol importante en remover los contaminantes (55).

La efectividad de la remediación depende del contaminante, las especies de plantas, y el suelo. La biomasa y el metabolismo de la planta juega un rol crítico en la eficiencia de la remediación, lo cual es afectado por el pH del suelo, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, procesos microbiales, y otras enmiendas del suelo (56).

La fitoextracción o fitoacumulación, involucra la absorción de metales tóxicos por las raíces de las plantas seguido de la traslocación de los metales absorbidos a los tallos y deposición en la vacuola, pared celular, membrana celular, y otras partes de los tejidos de las plantas, inactivos metabólicamente. Las plantas hiperacumuladoras, conocidas por remediar metales pesados, acumulan una alta concentración de metales tóxicos en sus tallos y raíces. El mecanismo general durante la acumulación de metales tóxicos incluye la absorción de cationes metálicos seguido por la formación del complejo metal-fitoquelatina o complejo metal-ligante (57).

La remediación puede ser alcanzada a través de la inactivación o inmovilización de contaminantes dentro de las raíces o en la rizosfera. La actividad estabilizante de las raíces de las plantas limita la movilidad del contaminante y la biodisponibilidad resultante en el menor efecto tóxico. Algunas plantas forman residuos ligados de contaminantes que ya no están disponibles como tóxicos o no pueden ser liberados a la matriz sólida después de su acumulación (58).

Los contaminantes pueden ser inmovilizados en la rizosfera con la ayuda de exudados fitoquímicos, o atrapados en la superficie radicular con la ayuda de proteínas de transporte, o secuestrados dentro de la vacuola de las células radiculares a través de

procesos celulares (59).

Los metales pesados y algunos contaminantes orgánicos pueden ser convertidos en compuestos no tóxicos a través de la conjugación con derivados de azúcares, proteínas, y aminoácidos o formando complejos en la rizosfera (60).

La rizofiltración involucra la remoción de sustancias tóxicas usando raíces de plantas en una zona saturada o remedia contaminantes acuosos de aguas residuales, napa freática o aguas superficiales a través de la adsorción, concentración y precipitación sobre las raíces u otros órganos sumergidos de plantas acuáticas tolerantes a metales (61). Este método es mayormente efectivo para remediación de suelo y agua altamente contaminada con nutrientes como el nitrógeno y fósforo (62).

La fitovolatilización comprende una serie de pasos. Primero, las plantas absorben contaminantes del suelo y transforman los productos químicos menos volátiles en formas más volátiles, y generan pérdida de contaminantes a la atmósfera a través del proceso de volatilización. Esta técnica trabaja bien cuando los contaminantes volatilizados tienen efectos menos tóxicos cuando se dividen del suelo a la atmósfera. La fitovolatilización trabaja bien mayormente para contaminantes orgánicos (63).

Mientras algunos compuestos pueden volatilizarse directamente del tallo y las hojas, algunos pueden volatilizarse debido a la interacción raíz-suelo. Los compuestos orgánicos hidrofóbicos salen del tallo y las hojas desde las barreras hidrofóbicas de la planta, como cortes, epidermis, suberina, y otras capas dermales. También, algunos compuestos se mueven ascendentemente en el sistema planta a través del flujo transpiratorio y pueden perderse en la atmósfera durante el proceso de transpiración (64).

Las plantas pueden metabolizar y destruir contaminantes dentro del tejido de las plantas a través del proceso conocido como fitodegradación. Los contaminantes orgánicos tales como pesticidas pueden ser remediados a través de la degradación o transformación por diferentes partes de la planta. En la fitodegradación, las partes de la planta pueden jugar un rol crucial directo o indirecto. En el proceso directo, la planta absorbe el contaminante y lo metaboliza o lo rompe en pequeños compuestos menos peligrosos y los distribuye dentro de los tejidos de la planta. Las plantas que no contiene transportadores activos, estos contaminantes orgánicos son absorbidos por

mecanismos pasivos. Cuando la degradación de contaminantes se presenta en la rizosfera es llamado rizodegradación (65).

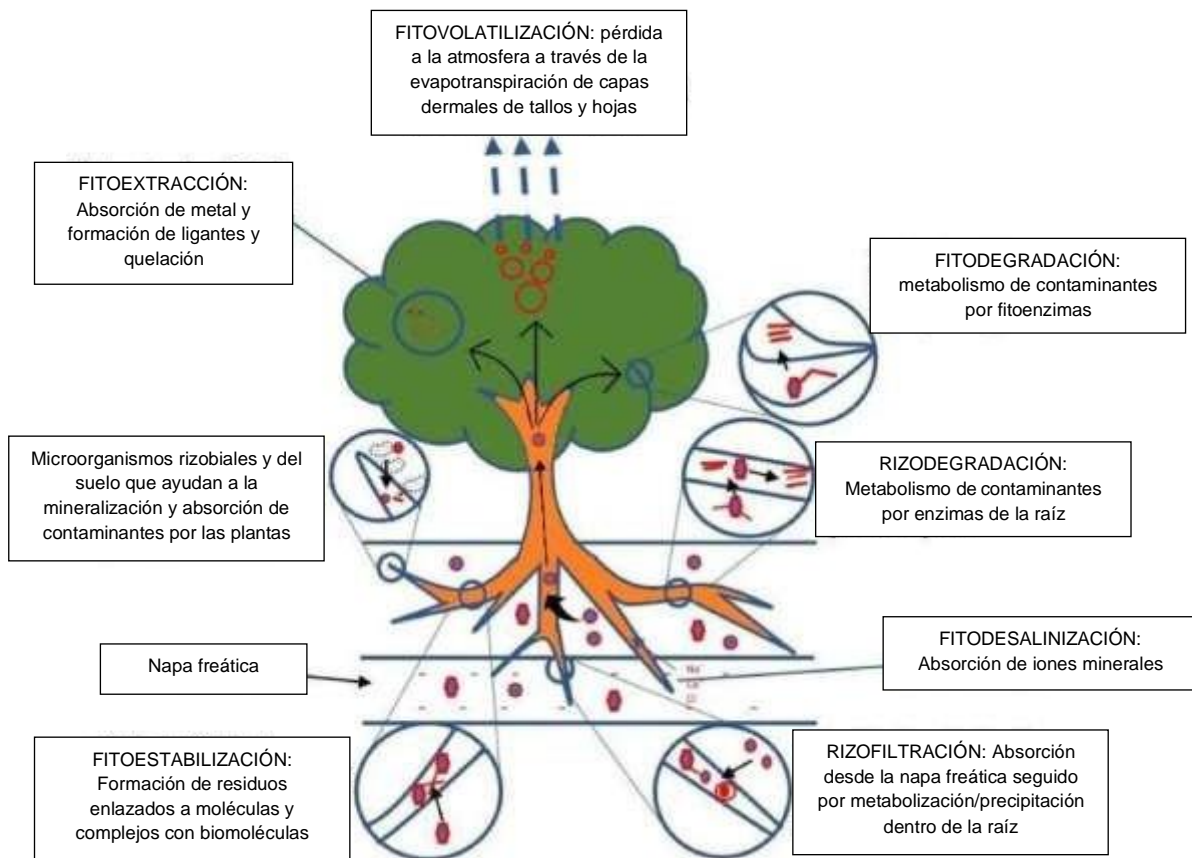


Figura 1. Los procesos de fitorremediación y sus funciones asociadas (66).

2.2.3 Las enmiendas orgánicas

Si bien la fitorremediación puede lograr la eliminación de contaminantes, hay una alternativa para mejorar estos resultados mediante la utilización de diferentes ayudas como son las enmiendas sintéticas y naturales, microorganismos y plantas genéticamente modificadas. Estos materiales que asisten la fitorremediación mejoran la formación de complejos quelatos-metales, incrementan la resistencia de plantas y el nivel de tolerancia a metales, y mejoran la traslocación y acumulación de metales dentro de las plantas, por lo tanto, incrementan la eficiencia total de la fitorremediación (66).

El compostaje degrada los residuos orgánicos complejos a través de diferentes microorganismos en formas simples, tales como el humus, nutrientes y componentes inorgánicos. El resultado es un enriquecimiento del suelo con alto contenido orgánico lo cual a su vez estimula el crecimiento de la planta y ayuda en atenuar los efectos tóxicos de los contaminantes. Además, el compost en el suelo puede regular la biodisponibilidad

y movilidad de metales pesados por mecanismos tales como la adsorción sobre las partículas del suelo, complejación con otros minerales, precipitación de elementos altamente móviles y reacciones redox (67).

La tecnología química mejorada es un método efectivo para facilitar la absorción de metales pesados y su traslocación en las plantas (68). Existen diferentes enmiendas químicas (agentes quelantes) que son usados para favorecer el proceso de fitoextracción. Entre ellos, tres enmiendas químicas son bastante estudiadas, el ácido etilen diamina tetracético (EDTA), el ácido etilen glicol tetra acético (EGTA), y el dodecil sulfato de sodio (SDS). Entre ellos, el EDTA es considerado el mejor y más efectivo en el proceso de fitoextracción (66).

El EDTA es frecuentemente usado en agricultura debido a su rol en movilizar metales pesados. Varios estudios han reportado la absorción de metales pesados favorecido por este quelato en las plantas. Mayormente las especies de plantas hiperacumuladoras pueden absorber un complejo metal-EDTA (69).

Los factores que afectan la efectividad del EDTA para remediar suelos contaminados son su concentración, la especie de planta, concentración de metales pesados, propiedades químicas de los metales, y tipo de suelo (70).

Los microorganismos pueden influenciar el proceso de fitorremediación a través de diferentes mecanismos. La degradación microbial de contaminantes orgánicos y la absorción mediada de metales pesados puede alcanzarse a través de la bioestimulación y la bioaugmentación. La bioestimulación es el proceso de estimulación de microorganismos existentes en suelos contaminados, a través de la adición de nutrientes como nitrógeno, fósforo, y donantes de electrones, para degradar contaminantes tóxicos. La bioaugmentación es el proceso donde los microorganismos naturales o genéticamente modificados son agregados al suelo para remover los contaminantes tóxicos (71).

El uso de rizobacterias promotoras del crecimiento de plantas (PGPR, por sus siglas en inglés) y las bacterias endófitas promotoras del crecimiento de plantas (PGPE, por sus siglas en inglés) favorecieron la solubilidad de metales al secretar protones y aniones orgánicos (72).

Las PGPR tienen el potencial para incrementar la eficiencia de la fitorremediación al incrementar el crecimiento y biomasa de la planta, mejorando la resistencia de la planta a patógenos, incrementando la tolerancia de la planta a metales, mejorando la absorción de nutrientes y la traslocación de metales pesados a través de la producción de ácidos orgánicos, enzimas, fitohormonas, y sideróforos (73).

2.2.4 Fitorremediación asistida Mecanismos y efectos

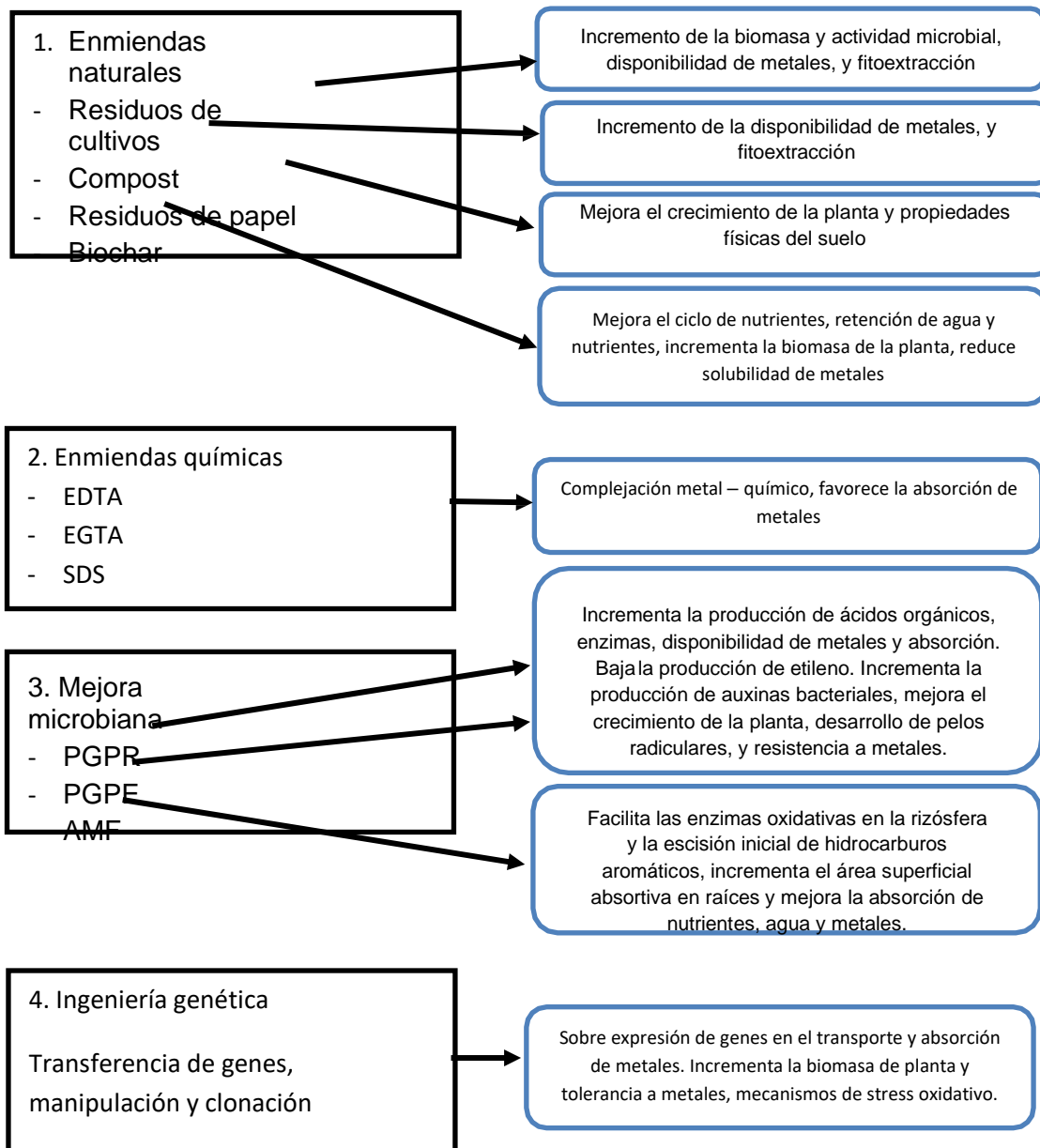


Figura 2. Fitorremediación asistida, mecanismos y efectos involucrados (66).

2.1.3 El coquito

El coquito (*Cyperus rotundus* L.) está reconocido como una de las malezas más dañinas del mundo. Esta ciperácea es originaria de la India y se encuentra distribuida en la zona tropical y subtropical del mundo. Es agresiva, de gran capacidad de competencia y adaptación a diversos medios y condiciones, lo que hace difícil su control y uno de los principales problemas para la agricultura (74).

Entre sus características sobresalientes está su propagación vegetativa por órganos y tubérculos, ser de fisiología C4 (eficientes fotosintéticamente) y sobrevivir a condiciones extremas de altas temperaturas, sequía, anegamiento y falta de aireación (74).

Una vez que esta especie se ha establecido en un campo de cultivo, su erradicación es casi imposible, y solo se trata de reducir su infestación para que no cause pérdidas económicas. Es esta la razón por la que los suelos que tienen "C. rotundus" pierden su valor comercial y se constituyen en focos de infestación (74).

2.3 Definición de términos básicos

Bioacumulación: Concentración resultante acumulada en el ambiente o en los tejidos de organismos a partir de la incorporación, distribución y eliminación de contaminantes obtenidos por todas las rutas de exposición por ejemplo por aire, agua, suelo, sedimento y alimento (75).

Biodisponibilidad: Característica de las sustancias tóxicas que indica la facilidad de incorporarse a los seres vivos mediante procesos o mecanismos, inhalación, ingesta o absorción, y que están influenciados por diferentes parámetros como, las rutas de exposición, las características fisiológicas del receptor y las características químicas del xenobiótico (75).

Contaminación: Distribución de una sustancia química o una mezcla de sustancias en un lugar no deseable (aire, agua, suelo), donde puede ocasionar efectos adversos al ambiente o sobre la salud (75).

Contaminante: Cualquier sustancia química que no pertenece a la naturaleza del suelo o cuya concentración excede la del nivel de fondo susceptible de causar efectos nocivos para la salud de las personas o el ambiente (75).

Estándar de Calidad Ambiental (ECA): Es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos (75).

Muestra compuesta: Es aquella constituida por un conjunto de muestras simples (submuestras), convenientemente mezcladas, y llevadas al laboratorio para su correspondiente análisis, siendo el resultado un valor analítico medio de la propiedad o compuesto analizado. El número de submuestras dependerá de la variabilidad de la sustancia o propiedad a analizar en el área de estudio y tiene la ventaja de permitir un muestreo mayor sin aumentar el número de muestras a analizar (75).

Suelo: Material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad (75).

Suelo contaminado: Suelo cuyas características químicas, han sido alteradas negativamente por la presencia de sustancias contaminantes depositadas por la actividad humana, según lo establecido en el D.S. N° 011-2017-MINAM (75).

Suelo agrícola: Suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas (75).

Cadmio: Es un metal pesado muy tóxico y se encuentra naturalmente en la corteza terrestre. Su movilidad en el suelo es afectada por el pH, materia orgánica, potencial redox y la cantidad de arcillas. Se encuentra en el ambiente como resultado de la actividad antropogénica. Su presencia en seres humano causa daño al riñón y sistema óseos, originando problemas oncológicos (76).

Enmienda: Las enmiendas naturales o sintéticas, son aplicadas en los suelos como una ayuda para mejorar la eficiencia de la fitorremediación principalmente por el incremento de la fitoextracción, el crecimiento de la planta, y retención de agua y nutrientes. Las enmiendas naturales son producidas por el procesamiento naturales de materiales como la caña de azúcar, papel, paja de arroz, etc. Las enmiendas químicas consisten en productos químicos sintéticos (66).

Fitoextracción: Es la habilidad de algunas especies vegetales para absorber metales pesados del suelo, acumulándolos generalmente en la parte aérea (77)

CAPÍTULO III : METODOLOGÍA

3.1 Método, y alcance de la investigación

3.1.1 Método general

El método de investigación fue hipotético – deductivo. Consiste en un procedimiento que parte de las aseveraciones en calidad de hipótesis y busca refutar o falsear tales hipótesis, deduciendo de ella conclusiones que deben confrontarse con los hechos (78).

3.1.1.1 Método específico

Se aplicó el método de análisis: se obtuvo una muestra de suelo del distrito de Sincos, para analizarse en el contenido de Cd y determinar el nivel de contaminación y sus características fisicoquímicas. Este suelo se distribuyó en macetas, donde se aplicó los tratamientos de enmiendas orgánicas, y se sembró "*Cyperus. rotundas*", y al final del periodo experimental se analizó Cd en la parte aérea y radicular de la planta, así como en el suelo.

Tabla 3. Métodos de análisis utilizados.

Variable	Método	Unidad
pH	Potenciómetro	-
Conductividad eléctrica	Conductímetro	dS.m ⁻¹
CaCO ₃	Calcímetro	%
Materia orgánica	Walkley-Black	%
Arena	Bouyoucos	%
Limo	Buyoucos	%
Arcilla	Bouyoucos	%
Clase textural	Triángulo textural	-
Fósforo	Olsen modificado	ppm
Potasio	Acetato de amonio	ppm
Capacidad de Intercambio Catiónico	Acetato de amonio	cmol.kg ⁻¹

Calcio cambiable	Absorción atómica	cmol.kg ⁻¹
Magnesio cambiable	Absorción atómica	cmol.kg ⁻¹
Potasio Cambiable	Absorción atómica	cmol.kg ⁻¹
Sodio cambiable	Absorción atómica	cmol.kg ⁻¹
Saturación de bases	Cálculo	%
Acidez cambiable	Cálculo	%

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes. UNALM, Lima.

3.1.1.2 Análisis de cadmio en el suelo

Se analizó el cadmio total en el suelo mediante digestión de la muestra de suelo y medición con Espectroscopía de Absorción Atómica de llama. El método de espectroscopía de llama tiene como requisito que la muestra sea introducida en disolución. En esta investigación se utilizó una digestión húmeda por medio de ácido nítrico, obteniendo extractos acuosos de cada muestra, y analizada por flama siguiendo el método de la USEPA 3051 A (79).

Por este método se realizó la medición de la concentración de cadmio que presenta absorción de la radiación a una longitud de onda particular. La especie atómica se logra por atomización de la muestra, pudiendo utilizar distintos procedimientos, técnicas y accesorios, para llegar al estado fundamental de átomo. Una de las técnicas más utilizadas para realizar la atomización es la absorción atómica con flama o llama, que se describe a continuación.

En un atomizador de flama se nebulizó una solución de la muestra, mediante el flujo de un gas oxidante mezclado con un combustible también gaseoso, y se llevó hacia una llama donde ocurre la atomización. Durante la desolvatación, el disolvente se evapora y produce un aerosol molecular finamente dividido; después, este se volatiliza para formar moléculas de gas. La disociación de la mayor parte de estas moléculas produce un gas atómico. Algunos de los átomos de este gas se ionizan y forman cationes y electrones. Una fracción de las moléculas, átomos e iones se excitan por el calor de la llama y producen espectros de emisión: atómicos, iónicos y moleculares (80).

Los átomos neutros gaseosos, en su estado fundamental, absorben radiación a longitudes de onda específicas. La medición de la magnitud de esa absorción atómica y su aplicación y análisis cuantitativo constituyen la espectrometría de absorción atómica. La fuente primaria de radiación luminosa es generalmente una lámpara de cátodo hueco del elemento cadmio (79).

3.1.2 Alcance de la investigación

3.1.2.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación fue aplicada, pues el presente estudio se utilizó los principios de la fitorremediación para determinar la concentración de cadmio en la parte aérea y raíz del "*Cyperus rotundus L.*", así como la concentración de este metal pesado en el suelo, para determinar el efecto de las enmiendas aplicadas, en condiciones ex situ, y controladas.

La investigación aplicada consiste en realizar trabajos aplicados con la finalidad de adquirir nuevos conocimientos, sin embargo, está dirigido fundamentalmente a un objetivo práctico específico. Este tipo de investigación implica la consideración de todos los conocimientos existentes y su profundización, en un intento de solucionar problemas específicos. Los resultados de la investigación aplicada se refieren, en primer lugar, a un único producto o a un número limitado de productos, operaciones, métodos o sistemas (81).

3.2 Nivel de investigación

Nivel de investigación explicativo, porque el interés está en explicar de qué manera la variable independiente (la enmienda orgánica) influye en la variable dependiente (fitorremediación).

3.3 Diseño de la investigación

3.3.1 Diseño experimental

El diseño experimental empleado fue Completamente al Azar (DCA), con ocho tratamientos y tres repeticiones por tratamiento, haciendo un total de 24 unidades experimentales.

El modelo aditivo lineal del diseño experimental es el siguiente (82):

$$\gamma_{ik} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij0}$$

γ_{ik} = Cualquier observación del experimento

μ = Media poblacional

τ_i = Efecto del i-ésimo tratamiento

ε_{ij0} = Error experimental

Tabla 4. Tratamientos en estudio

Nº	Descripción
1	Suelo contaminado (Cd) + EM (5%) + <i>Cyperus rotundus</i> L.
2	Suelo contaminado (Cd) + lombricompost (20%) + <i>Cyperus rotundus</i> L.
3	Suelo contaminado (Cd) + EDTA (0.1%) + <i>Cyperus rotundus</i> L.
4	Suelo contaminado (Cd) + EM (5%) + Lombricompost (20%) + <i>Cyperus rotundus</i> L.
5	Suelo contaminado (Cd) + EM (5%) + EDTA (0.1%) + <i>Cyperus rotundus</i> L.
6	Suelo contaminado (Cd) + Lombricompost (20%) + EDTA (0.1%) + <i>Cyperus rotundus</i> L.
7	Suelo contaminado (Cd) + EM (5%) + Lombricompost (20%) + EDTA (0.1%) + <i>Cyperus rotundus</i> L.
8	Suelo contaminado (Cd)

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Procedimiento experimental

- Ubicada la parcela agrícola en el distrito de Sincos, se muestreó con base en la Guía de Muestreo de Suelos del Ministerio del Ambiente (83).
- De la parcela, se obtuvo 23 muestras simples a la profundidad promedio de 0 – 30 cm, para después de mezclarlas uniformemente. Se obtuvo aproximadamente 115 kilogramos de suelo para la ejecución del experimento.
- Seguidamente se separó una muestra compuesta de 1 kg aproximadamente para enviar al laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes de la UNALM, Lima, para el análisis de caracterización y Cd.
- La muestra de suelo obtenida en el campo se secó al aire libre y tamizada con el tamiz Nº 10, de 2 mm de malla.
- Posteriormente, el suelo tamizado, se colocó en macetas de 4 kg de capacidad, ya a todos se agregó los tratamientos en estudio, utilizando una balanza de precisión y una balanza analítica.
- Posteriormente se transplantó el "*Cyperus. rotundus*", que había sido previamente sembrado en un almácigo. Se colocó 6 plantas por cada unidad experimental.
- Para este efecto las macetas se colocaron bajo un cobertor rústico, para evitar

el efecto de exceso de lluvia o de sol, durante el periodo experimental.

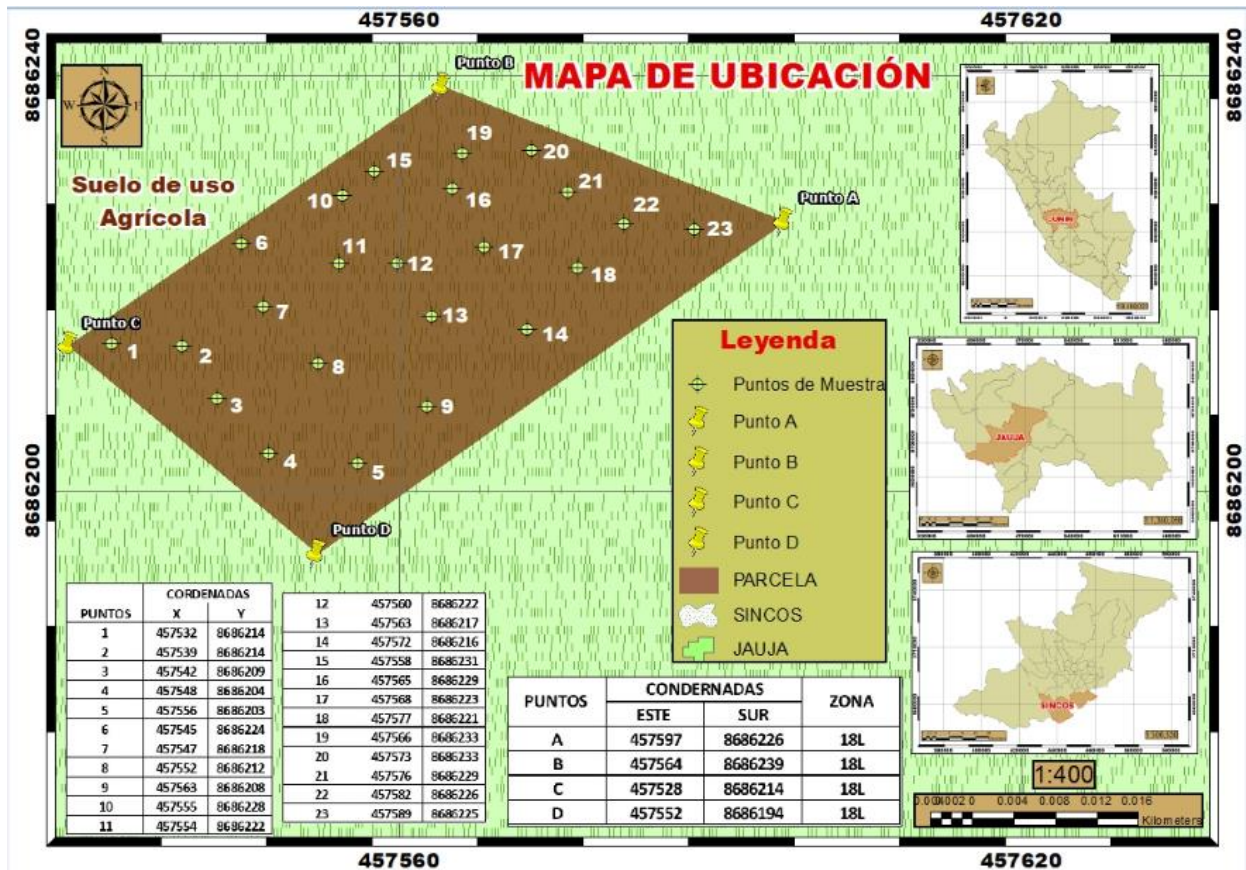


Figura 3. Ubicación de la parcela agrícola.

Tabla 5. Resultados del análisis de caracterización, del suelo del experimento.

Parámetro	Sincos
pH	7.57
Conductividad Eléctrica (dS/m)	0.56
CaCO ₃ (%)	10.20
Materia Orgánica (%)	2.80
Arena (%)	76
Limo (%)	25
Arcilla (%)	8
Clase textural	Franco arenoso
Fósforo (ppm)	35.3
Potasio (ppm)	140

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (meq/100 g)	14.08
Calcio cambiable (meq/100 g)	11.03
Magnesio cambiable (meq/100 g)	2.47
Potasio cambiables (meq/100 g)	0.35
Sodio cambiable (meq/100 g)	0.23
Aluminio más Hidrógeno	0.00
Saturación de bases (%)	100.00

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima

El suelo de Sincos tiene un pH ligeramente alcalino (pH = 7.1 – 7.8). La conductividad eléctrica (CE) calificó a este suelo como no salinos (CE = 0 – 2 dS.m⁻¹). El contenido de calcáreo fue alto (CaCO₃ = 5 – 15%). El contenido de materia orgánica fue calificado como medio (MO = 2 – 4%). La textura fue moderadamente gruesa, que incluye a suelos francos, con predominancia de la fracción arena. El contenido de P fue alto (P > 14 ppm). El potasio fue calificado como medio (K = 100 – 240 ppm). La CIC fue moderadamente alta (CIC = 12 – 20 meq/100 g). De los cationes cambiables, predomina el calcio en todos los suelos, con el siguiente orden para los demás cationes cambiables: Ca⁺² > Mg⁺² > K⁺ > Na⁺ > H⁺ + Al⁺³). La saturación de bases fue alta (SB > 50%). La calificación de estos datos fue con la Tabla de interpretación de análisis de suelos (Anexo 2). Los datos se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados del análisis de Cd en el suelo.

Parámetro	Sincos
Cd (mg/kg) en Sincos	8.77
Cd (mg/kg) en ECA	1.4
Factor de contaminación Cd (Cd Suelo/Cd ECA)	6.26
Calificación	Contaminado Cd

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes. UNALM, Lima.

El suelo de Sincos tuvo contenido de Cd superior al ECA de suelos agrícolas; según estos resultados, este suelo está contaminado con Cd. El factor de contaminación de Cd fue mayor de 6.26. Los datos se presentan en la tabla 9.

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

Para esta investigación la población está conformada por las plantas de *Cyperus rotundus* L. en todas las unidades experimentales.

3.4.2 Muestra

Para esta investigación la muestra final de las plantas de *Cyperus rotundus* L. lo constituyeron tres plantas, que se uniformizaron en cada una de las macetas (unidades experimentales). Al inicio del experimento (después del trasplante), la población total de plantas fue creciendo y 5 a 10 días después del trasplante, se hizo el entresaque o selección, dejando las tres plantas mejor conformadas o vigorosas hasta el final del experimento.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.5.1 Materia seca de la planta

A la cosecha, se cortó las tres plantas de *Cyperus rotundus* L. de cada unidad experimental a ras del suelo y se colocaron en bolsas de papel, debidamente identificadas; lo mismo se hizo con las raíces; para llevarlas a una estufa y realizar el secado a una temperatura promedio de 60 °C por un periodo de 48 horas; posteriormente se pesó cada tratamiento y se registró la materia seca de cada tratamiento y repetición.

3.5.2 Análisis de cadmio en la planta

Las muestras secas de raíces y tallos, de cada unidad experimental, fueron debidamente identificadas y enviadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Agraria La Molina para el análisis de cadmio total.

3.5.3 Análisis de cadmio en el suelo después del experimento

El suelo de cada unidad experimental fue homogenizado y se extrajo una muestra de aproximadamente un kilogramo, se etiquetó según el tratamiento y repetición y se envió al laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Agraria La Molina para el análisis de cadmio total.

3.5.4 Cálculo del factor de bioacumulación (FBC)

Para hallar el FBC de cadmio, se calculó en la parte aérea, radicular y total (aérea + radicular), utilizando la siguiente expresión (84):

$$FBC_{Cd \text{ en tallos}} = \frac{\text{Concentración Cd en tallos}}{\text{Concentración de Cd en el suelo}}$$

$$FBC_{Cd \text{ en raíces}} = \frac{\text{Concentración Cd en raíces}}{\text{Concentración de Cd en el suelo}}$$

$$FBC_{Cd \text{ total}} = \frac{\text{Concentración Cd en tallos + raíces}}{\text{Concentración de Cd en el suelo}}$$

Para calcular la disminución porcentual del Cd en el suelo se utilizará la siguiente expresión:

$$\% \text{ disminución} = ((Cd \text{ inicial} - Cd \text{ final}) / (Cd \text{ inicial})) \times 100$$

3.5.5 Cálculo del factor de translocación (FT)

Para hallar el FT de cadmio, se relacionó el contenido de este metal pesado en la parte aérea y raíz, de cada tratamiento y repetición, utilizando la siguiente expresión (84):

$$FT_{Cd} = \frac{\text{Concentración Cd en hojas}}{\text{Concentración de Cd en la raíz}}$$

Las plantas que tienen factores de bioconcentración y translocación >1 pueden ser usadas como bioacumuladoras (86). Las plantas pueden ser usadas como fitoestabilizadoras si tienen factores de bioconcentración < 1 y factores de translocación < 1; y como fitoextractoras si tienen factor de bioconcentración < 1 y factor de translocación > 1 (87).

3.5.6 Procesamiento de los datos

Al finalizar la obtención de datos estos fueron sistematizados, primero se verificó la distribución normal de cada variable utilizando la prueba de Shapiro – Wilks; si la variable evaluada tenía distribución normal se realizó el análisis de variancia y la prueba de significación de Duncan; si la variable evaluada no tenía distribución normal se realizó la prueba de no paramétrica de Kruskal – Wallis. Se utilizó el software INFOSTAT (85).

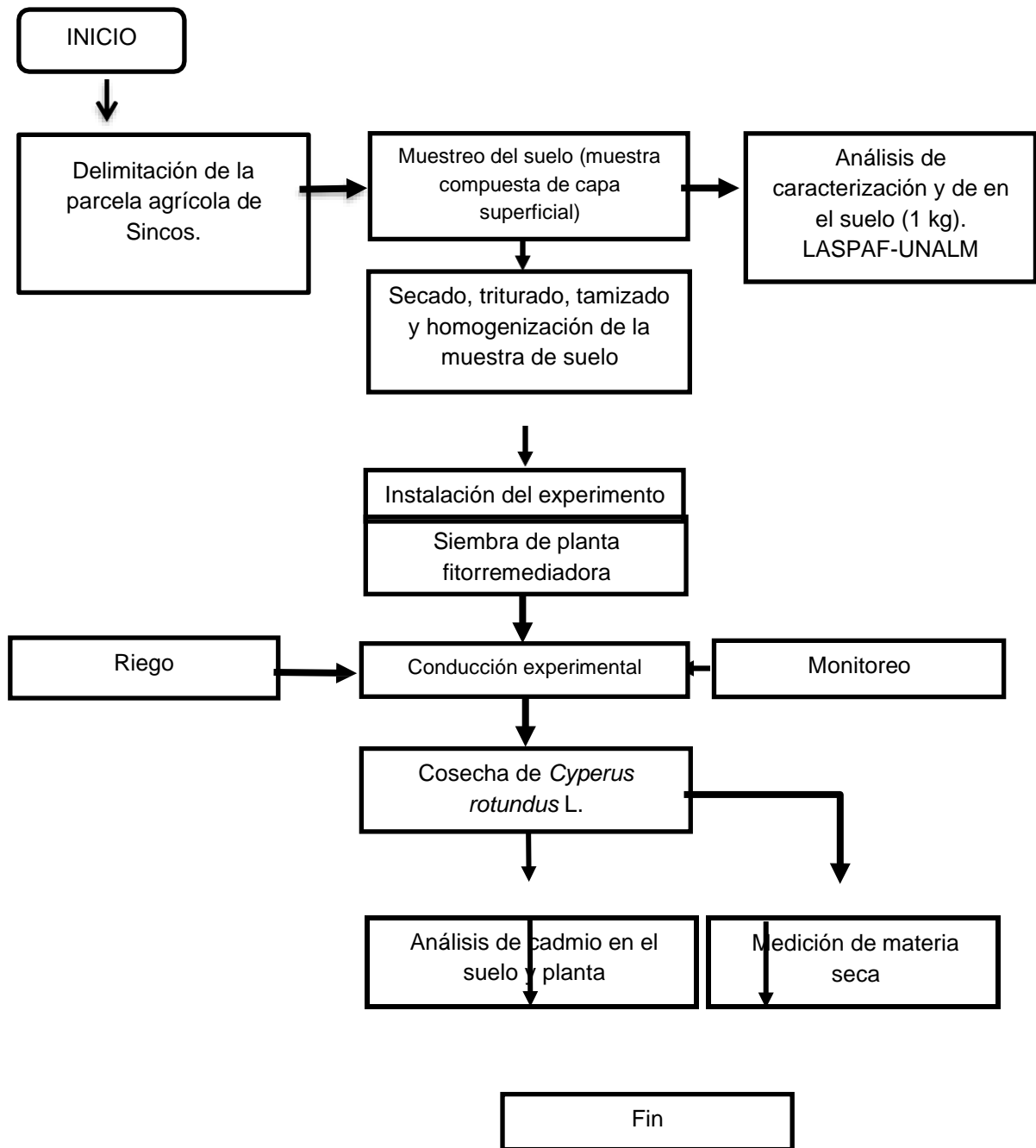


Figura 4. Diagrama metodológico del proceso experimental.

CAPÍTULO IV : RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información

Los resultados de los análisis de cadmio (Cd) en la parte aérea y radicular de *Cyperus rotundus L.*, análisis de Cd en el suelo, así como los cálculos de los índices de fitorremediación, factor de bioacumulación (FBC) y factor de traslocación (FT), al final del experimento, que tuvo una duración de tres meses, entre mayo y agosto del año 2021, fueron ordenados, procesados y se presentan en este capítulo para su discusión.

4.1.1 Contenido de Cd en la parte aérea de *Cyperus rotundus L.*

Tabla 7. Resultados de la concentración de Cd en la parte aérea (mg.kg-1)

Tratamiento	Repeticiones			Promedio
	I	II	III	
T1: EM (5%)	3.51	2.62	2.80	2.98
T2: LC (20%)	3.41	3.05	3.85	3.44
T3: EDTA (0.1%)	4.52	3.59	4.15	4.09
T4: EM (5) + LC (20%)	6.48	3.55	3.07	4.37
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	3.38	2.54	2.64	2.85
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	4.63	4.81	6.32	5.25
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	5.06	5.46	3.99	4.84
T8: TESTIGO	4.67	4.35	5.20	4.74

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes, UNALM, Lima.

El contenido de Cd en la parte aérea tuvo promedios más altos (4.84 mg/kg), en los tratamientos con EM(5%)+LC(20%)+EDTA (0.1%), mostrando el efecto de la aplicación de enmiendas en la absorción de Cd por *C. rotundus L.* Los datos se presentan en la tabla 7.

4.1.2 Contenido de Cd en raíces

Tabla 8. Resultados del contenido de Cd en raíces (mg/kg)

Tratamiento	Repeticiones			Promedio
	I	II	III	
T1: EM (5%)	1.92	1.28	1.87	1.69
T2: LC (20%)	1.36	1.96	1.95	1.76
T3: EDTA (0.1%)	1.89	1.43	1.85	1.72
T4: EM (5) + LC (20%)	3.73	1.30	1.82	2.28
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	1.90	1.40	1.78	1.69
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	1.93	1.47	2.80	2.07
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	1.80	3.15	1.97	2.31
T8: TESTIGO	1.34	1.27	1.55	1.39

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes, UNALM, Lima.

El contenido de Cd en las raíces fue mayor en el tratamiento con las tres enmiendas orgánicas (EM;EDTA Y LC), evidenciando el efecto de las enmiendas en la mayor absorción de Cd. Los datos se presentan en la tabla 8.

4.1.3 Contenido de materia seca

Tabla 9. Resultados del peso de materia seca (g) en la parte aérea

Tratamiento	Repeticiones			Promedio
	I	II	III	
T1: EM (5%)	8.46	8.23	8.12	8.27
T2: LC (20%)	9.00	8.84	8.07	8.64
T3: EDTA (0.1%)	7.61	7.80	8.04	7.82
T4: EM (5) + LC (20%)	7.34	8.36	8.66	8.12
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	7.65	7.95	8.18	7.93
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	8.02	8.00	7.52	7.85
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	7.75	7.72	7.87	7.78
T8: TESTIGO	7.70	7.84	7.62	7.72

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes, UNALM, Lima.

El contenido de materia seca tuvo promedio mayor en el tratamiento con lombricompost (LC 20%), evidenciando que esta enmienda mejora el suelo y permite un mayor crecimiento de la planta del experimento. El testigo tuvo menor materia seca, atribuible a la presencia de Cd en el suelo, lo cual imitaría su crecimiento. Los datos se presentan en la tabla 9.

Tabla 10. Resultados del peso de materia seca (g) en la parte radicular.

Tratamiento	Repeticiones			Promedio
	I	II	III	
T1: EM (5%)	8.76	8.34	8.37	8.49
T2: LC (20%)	11.48	8.46	8.80	9.58
T3: EDTA (0.1%)	7.68	8.02	8.24	7.98
T4: EM (5) + LC (20%)	7.31	9.10	9.19	8.53
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	8.01	8.35	8.43	8.26
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	8.68	7.95	7.68	8.10
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	7.67	7.75	7.76	7.72
T8: TESTIGO	7.92	8.51	7.82	8.08

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes, UNALM, Lima.

El contenido de materia seca de la raíz, en promedio, fue mayor en el tratamiento con lombricompost LC (20%), corroborando que esta enmienda al mejorar las propiedades del suelo, permite un mayor crecimiento radicular, considerando que en este órgano se forman los tubérculos que son los medios de propagación del *C. rotundus*. Los datos se presentan en la tabla 10.

4.1.4 Factor de bioacumulación (FBC) en la parte aérea

Tabla 11. Resultados del FBC de Cd en la parte aérea

Tratamiento	Repeticiones			Promedio
	I	II	III	
T1: EM (5%)	0.56	0.48	0.39	0.48
T2: LC (20%)	0.58	0.57	0.66	0.60
T3: EDTA (0.1%)	0.70	0.53	0.62	0.62
T4: EM (5) + LC (20%)	1.14	0.59	0.53	0.75
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	0.51	0.39	0.40	0.43
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	0.75	0.79	1.06	0.87
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	0.87	0.96	0.69	0.84
T8: TESTIGO	0.74	0.69	0.81	0.75

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes, UNALM, Lima.

El FBC fue, en promedio, mayor en los tratamientos con LC (20%)+EDTA (0.1%) y EM (5) +LC (20%) +EDTA (0.1%), indicando que estas enmiendas, en conjunto, incrementaron la concentración de Cd en la parte aérea, que fue absorbida por la planta de *C. rotundus* desde el suelo y traslocada a la parte aérea. Los datos se presentan en la tabla 11.

Tabla 12. Resultados del FBC de Cd en la parte radicular

Tratamiento	Repeticiones			Promedio
	I	II	III	
T1: EM (5%)	0.30	0.24	0.26	0.27
T2: LC (20%)	0.23	0.37	0.34	0.31
T3: EDTA (0.1%)	0.29	0.21	0.27	0.26
T4: EM (5) + LC (20%)	0.65	0.22	0.31	0.39
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	0.29	0.21	0.27	0.26
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	0.31	0.24	0.47	0.34
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	0.31	0.55	0.34	0.40
T8: TESTIGO	0.21	0.20	0.24	0.22

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes, UNALM, Lima.

El FBC en raíces, en promedio, fue mayor en el tratamiento con las tres enmiendas orgánicas combinadas (LC 20%); (EDTA 0.1%) y (EM 5%) mostrando el efecto de estos materiales orgánicos en favorecer la absorción de Cd y acumularlo en las raíces. Los datos se presentan en la tabla 12.

Tabla 13. Resultados del FBC total de Cd

Tratamiento	Repeticiones			Promedio
	I	II	III	
T1: EM (5%)	0.86	0.72	0.66	0.75
T2: LC (20%)	0.81	0.94	1.00	0.92
T3: EDTA (0.1%)	0.99	0.75	0.89	0.88
T4: EM (5) + LC (20%)	1.79	0.81	0.84	1.15
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	0.80	0.60	0.68	0.69
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	1.06	1.04	1.53	1.21
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	1.17	1.52	1.03	1.24
T8: TESTIGO	0.95	0.89	1.05	0.96

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes, UNALM, Lima.

El FBC total presentó mayores promedios en el tratamiento con las tres enmiendas combinadas, mostrando el efecto favorable de estos materiales orgánicos en mejora del suelo y absorción de Cd en Sincos. Los datos se presentan en la tabla 13.

4.1.5 Factor de translocación (FT)

Tabla 14. Resultados del FT de Cd

Tratamiento	Repeticiones			Promedio
	I	II	III	
T1: EM (5%)	1.83	2.04	1.50	1.79
T2: LC (20%)	2.51	1.55	1.97	2.01
T3: EDTA (0.1%)	2.39	2.51	2.24	2.38
T4: EM (5) + LC (20%)	1.74	2.73	1.68	2.05
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	1.78	1.81	1.48	1.69
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	2.40	3.28	2.26	2.65
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	2.82	1.73	2.03	2.19
T8: TESTIGO	3.50	3.42	3.34	3.42

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes, UNALM, Lima.

El FT fue mayor que 1 en todos los tratamientos, indicando que el Cd es traslocados de la raíz a la parte aérea. Los promedios más altos se observaron en el tratamiento con LC (20%) +EDTA (0.1%). Los datos se presentan en la tabla 14.

4.1.6 Contenido de Cd en el suelo

Tabla 15. Resultados del contenido de Cd en el suelo.

Tratamiento	Repeticiones			Promedio
	I	II	III	
T1: EM (5%)	6.32	5.42	7.10	6.28
T2: LC (20%)	5.87	5.35	5.80	5.67
T3: EDTA (0.1%)	6.45	6.72	6.75	6.64
T4: EM (5) + LC (20%)	5.70	6.02	5.82	5.85
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	6.60	6.53	6.55	6.56
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	6.20	6.05	5.95	6.07
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	5.85	5.68	5.77	5.77
T8: TESTIGO	6.32	6.30	6.45	6.36

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes, UNALM, Lima.

El contenido final de Cd en el suelo fue menor que el suelo con LC, evidenciando el efecto de esta enmienda en disminuir la concentración de Cd en el suelo, respecto al valor inicial, que fue de 8.77 mg/kg. Aún los valores analizados son superiores al ECA de suelos, debido a que la fitorremediación es un proceso progresivo. Los datos se presentan en la tabla 15.

4.2 Prueba de hipótesis

4.2.1 Hipótesis específica 1:

“Los EM, el lombricompost y el EDTA afectarán significativamente la absorción de Cd y formación de materia seca, en *Cyperus rotundus* L., en un suelo contaminado de Sincos”.

4.2.1.1 Concentración de Cd en la parte aérea

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se realizó la prueba de normalidad de Shapiro Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó las siguientes hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 16. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de Cd (mg/kg) en la parte aérea.

Tratamiento	Media	W	p-valor
T1: EM (5%)	2.98	0.89	0.3543
T2: LC (20%)	3.44	1.00	0.8904
T3: EDTA (0.1%)	4.09	0.99	0.7743
T4: EM (5) + LC (20%)	4.37	0.85	0.2483
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	2.85	0.84	0.2086
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	5.25	0.83	0.1860
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	4.84	0.94	0.5100
T8: TESTIGO	4.74	0.98	0.7276

Fuente: elaboración propia

Como el p-valor, es mayor que 0.05 se acepta Ho y se rechaza Ha, indicando que la población de donde provienen los datos de la muestra está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 16. Se desarrolló, entonces, el análisis de varianza.

Tabla 17. Análisis de varianza para el contenido de Cd en hojas.

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 18. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de Cd en la parte radicular

Tratamiento	Media	W	p-valor
T1: EM (5%)	1.69	0.81	0.1346
T2: LC (20%)	1.76	0.76	0.0271
T3: EDTA (0.1%)	1.72	0.81	0.1483
T4: EM (5) + LC (20%)	2.28	0.90	0.3895
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	1.69	0.92	0.4409
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	2.07	0.97	0.6608
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	2.31	0.84	0.2207
T8: TESTIGO	1.39	0.92	0.4628

Fuente: elaboración propia

Como el p-valor, en el tratamiento 2 es menor que 0.05, se rechaza Ho y se acepta Ha; la población, de donde proviene la muestra, no está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 18.

Se procedió a realizar la prueba de Kruskal Wallis, para lo cual se planteó la siguiente hipótesis:

Ho: los tratamientos son iguales estadísticamente

Ha: los tratamientos son diferentes estadísticamente

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 19. Prueba de Kruskal Wallis para el contenido de Cd en la parte radicular

Tratamiento	Media	D.E	H	p
T1: EM (5%)	1.69	0.36	7.13	0.4151
T2: LC (20%)	1.76	0.34		
T3: EDTA (0.1%)	1.72	0.25		
T4: EM (5) + LC (20%)	2.28	1.28		
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	1.69	0.26		
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	2.07	0.68		
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	2,31	0.74		
T8: TESTIGO	1.39	0.15		

Fuente: elaboración propia

Como el p-valor es superior a 0.05, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa, concluyendo que el contenido de Cd en la parte radicular de *Cyperus otundus* L. no presenta diferencias significativas entre los tratamientos. Los datos se presentan en la tabla 19.

4.2.1.3 Contenido de materia seca en la parte aérea

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se realizó la prueba de normalidad de Shapiro Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó las siguientes hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Para la prueba de normalidad se planteó las siguientes hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 22. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido materia seca radicular de *Cyperus rotundus* L.

Tratamiento	Media	W	p-valor
T1: EM (5%)	8.49	0.80	0.1058
T2: LC (20%)	9.58	0.83	0.1979
T3: EDTA (0.1%)	7.98	0.99	0.7650
T4: EM (5) + LC (20%)	8.53	0.79	0.0835
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	8.26	0.89	0.3643
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	8.10	0.93	0.5036
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	7.72	0.81	0.1438
T8: TESTIGO	8.08	0.86	0.2549

Fuente: elaboración propia

Como el p-valor, en todos los tratamientos es mayor que 0.05, se acepta Ho y se rechaza Ha; la población de donde proviene la muestra está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 22.

Tabla 23. Análisis de variancia para el contenido de materia seca radicular.

F. de V.	S.C.	G.L.	C.M.	Fc.	p-valor
Tratamiento	6.69	7	0.96	1.71	0.1769
Error	8.95	16	0.56		
Total	15.64	23			

S = 0,748

$\bar{x} = 8.34$

CV = 8.97 %

El análisis de variancia presenta un p-valor superior al nivel de significación ($\alpha > 0.05$) en la fuente de tratamientos, indicando que los tratamientos no son diferentes estadísticamente. Se acepta la hipótesis nula. Los datos se presentan en la tabla 23.

4.2.2 Hipótesis específica 2

“Los factores de bioacumulación y de translocación de cadmio en *Cyperus rotundus* L. serán afectados significativamente debido a la aplicación de EM, lombricompost y EDTA en un suelo contaminado de Sincos”

4.2.2.1 Factor de bioacumulación en la parte aérea

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se realizó la prueba de normalidad de Shapiro Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó las siguientes hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 24. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido el FBC en la parte aérea.

Tratamiento	Media	W	p-valor
T1: EM (5%)	0.48	1.00	0.9318
T2: LC (20%)	0.60	0.83	0.1960
T3: EDTA (0.1%)	0.62	1.00	0.9318
T4: EM (5) + LC (20%)	0.75	0.82	0.1721
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	0.43	0.81	0.1438
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	0.87	0.84	0.2273
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	0.84	0.96	0.6394
T8: TESTIGO	0.75	0.99	0.8231

Fuente: elaboración propia

Como el p-valor, es mayor que el nivel de significación ($\alpha > 0.05$), se acepta Ho y se rechaza Ha, indicando que la población, de donde proviene la muestra, está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 24.

Se aplicó el análisis de variancia, para determinar la significación entre tratamientos, planteándose la siguiente hipótesis:

Ho: los tratamientos son iguales estadísticamente

Ha: los tratamientos son diferentes estadísticamente

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 25. Análisis de variancia para el FBC en la parte aérea.

F. de V.	S.C.	G.L.	CM	Fc.	p-valor
Tratamiento	0.54	7	0.08	3.35	0.0215
Error	0.37	16	0.02		
Total	0.91	23			

S = 0.141 $\bar{x} = 0.67$ CV = 21.04 %

De los resultados del ANVA, se rechaza H_0 y se acepta H_a , debido a que el p-valor es menor que el nivel de significación ($\alpha < 0.05$), indicando que los tratamientos son diferentes estadísticamente. Los datos se presentan en la tabla 25.

Para determinar la significación entre tratamientos, se realizó la prueba de Duncan, planteándose la siguiente hipótesis:

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_8$

H_a : Al menos un tratamiento es diferente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

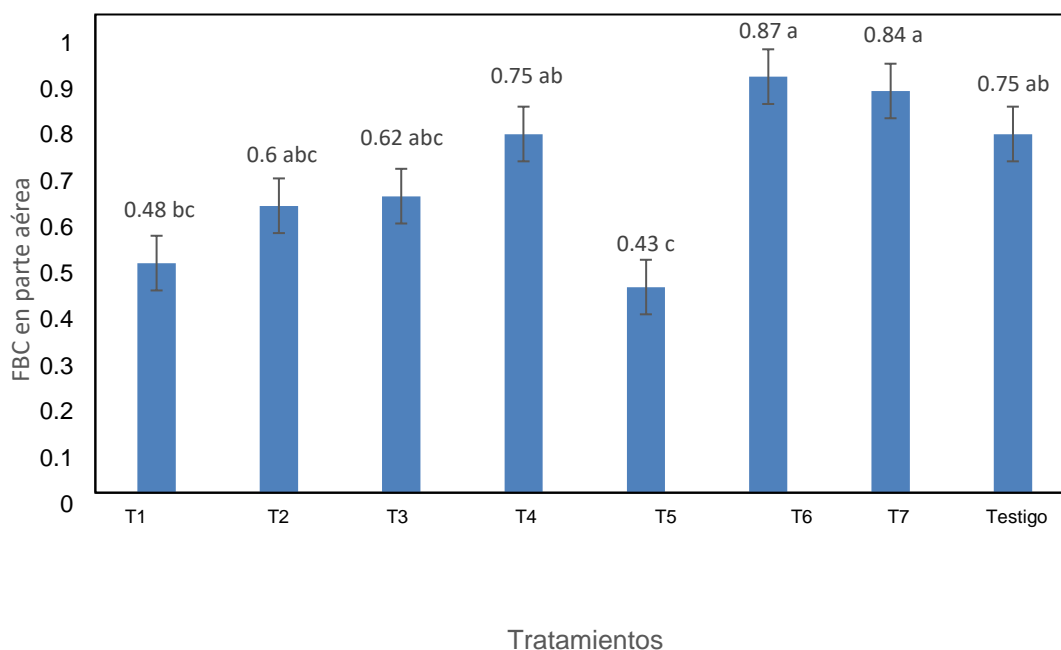


Figura 6. Prueba de Duncan para el FBC en parte aérea.

De los resultados de la prueba de Duncan, se acepta H_a , sobresaliendo los tratamientos T6 y T7, con valores de 0.87 y 0.84, respectivamente.

4.2.2.2 Factor de bioacumulación en la parte radicular

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se realizó la prueba de normalidad de Shapiro Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó las siguientes hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 26. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido el FBC en la parte radicular

Tratamiento	Media	W	p-valor
T1: EM (5%)	0.27	0.96	0.6394
T2: LC (20%)	0.31	0.90	0.3877
T3: EDTA (0.1%)	0.26	0.92	0.4628
T4: EM (5) + LC (20%)	0.39	0.90	0.3804
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	0.26	0.92	0.4628
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	0.34	0.95	0.5740
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	0.40	0.84	0.2190
T8: TESTIGO	0.22	0.92	0.4628

Fuente: elaboración propia

Como el p-valor, es mayor que el nivel de significación ($\alpha > 0.05$), se acepta Ho y se rechaza Ha, indicando que la población, de donde proviene la muestra, está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 26.

Se aplicó el análisis de variancia, para determinar la significación entre tratamientos, planteándose la siguiente hipótesis:

Ho: los tratamientos son iguales estadísticamente

Ha: los tratamientos son diferentes estadísticamente

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Como el p-valor, es mayor que el nivel de significación ($\alpha > 0.05$), se acepta H_0 y se rechaza H_a , indicando que la población, de donde proviene la muestra, está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 28.

Se aplicó el análisis de variancia, para determinar la significación entre tratamientos, planteándose la siguiente hipótesis:

H_0 : los tratamientos son iguales estadísticamente

H_a : los tratamientos son diferentes estadísticamente

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 29. Análisis de variancia para el FBC total.

F. de V.	S.C.	G.L.	CM	Fc.	p-valor
Tratamiento	0.90	7	0.13	2.04	0.1131
Error	1.01	16	0.06		
Total	1.91	23			

$S = 0.245$ $\bar{x} = 0.97$ $CV = 25.252 \%$

De los resultados del ANVA, se acepta H_0 y se rechaza H_a , debido a que el p-valor es mayor que el nivel de significación ($\alpha > 0.05$), indicando que los tratamientos son iguales estadísticamente. Los datos se presentan en la tabla 29.

4.2.2.4 Factor de translocación

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se realizó la prueba de normalidad de Shapiro Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó las siguientes hipótesis:

H_0 : La población está distribuida normalmente.

H_a : La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 30. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el FT

Tratamiento	Media	W	p-valor
T1: EM (5%)	1.79	0.98	0.7700
T2: LC (20%)	2.01	0.99	0.8648
T3: EDTA (0.1%)	2.38	1.00	0.8773
T4: EM (5) + LC (20%)	2.05	0.79	0.0978
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	1.69	0.82	0.1575
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	2.65	0.85	0.2428
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	2.19	0.94	0.5144
T8: TESTIGO	3.42	1.00	>0.9999

Fuente: elaboración propia

Como el p-valor, es mayor que el nivel de significación ($\alpha > 0.05$), se acepta H_0 y se rechaza H_a , indicando que la población, de donde proviene la muestra, está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 30.

Se aplicó el análisis de variancia, para determinar la significación entre tratamientos, planteándose la siguiente hipótesis:

H_0 : los tratamientos son iguales estadísticamente

H_a : los tratamientos son diferentes estadísticamente

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 31. Análisis de variancia para el FT.

F. de V.	S.C.	G.L.	CM	Fc.	p-valor
Tratamiento	6.50	7	0.93	5.56	0.0022
Error	2.67	16	0.17		
Total	9.16	23			

$S = 0.412$ $\bar{x} = 2.27$ $CV = 18.163 \%$

De los resultados del ANVA, se rechaza H_0 y se acepta H_a , debido a que el p-valor es menor que el nivel de significación ($\alpha < 0.05$), indicando que los tratamientos son diferentes estadísticamente. Los datos se presentan en la tabla 31.

Para determinar la significación entre tratamientos, se realizó la prueba de Duncan, planteándose la siguiente hipótesis:

Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_8$

Ha: Al menos un tratamiento es diferente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

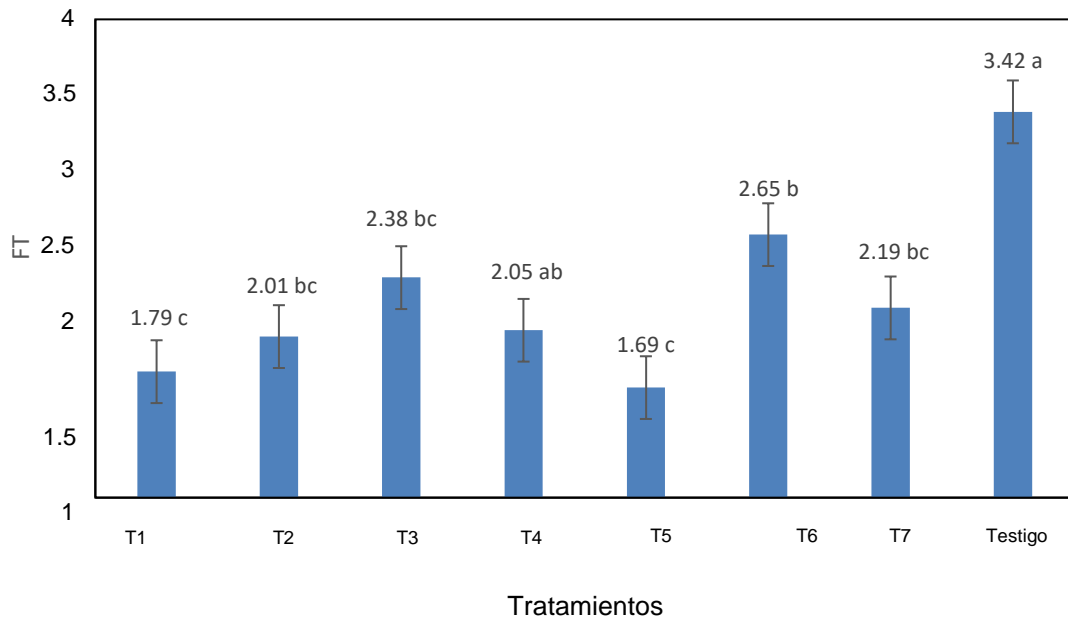


Figura 7. Prueba de Duncan para el FT.

De los resultados de la prueba de Duncan, se observa que el tratamiento testigo con un promedio de 3.42 ocupa el primer lugar (letra a), superando estadísticamente a los demás tratamientos. Esto permite aceptar la hipótesis planteada. Los datos se presentan en la figura 7.

4.2.3 Hipótesis específica 3

“La concentración de cadmio en el suelo disminuirá significativamente debido al proceso de fitorremediación por *Cyperus rotundus* L. con la aplicación de EM, lombricompost y EDTA”

4.2.3.1 Concentración de Cd en el suelo

Para comprobar la hipótesis planteada, primero se realizó la prueba de normalidad de Shapiro Wilks.

Para la prueba de normalidad se planteó las siguientes hipótesis:

Ho: La población está distribuida normalmente.

Ha: La población no está distribuida normalmente.

Nivel de significación: $\alpha = 0.05$

Tabla 32. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks para el contenido de Cd en el suelo.

Tratamiento	Media	W	p-valor
T1: EM (5%)	6.28	1.00	0.9208
T2: LC (20%)	5.67	0.85	0.2374
T3: EDTA (0.1%)	6.64	0.82	0.1734
T4: EM (5) + LC (20%)	5.85	0.98	0.7232
T5: EM (5%) + EDTA (0.1%)	6.56	0.94	0.5351
T6: LC (20%) + EDTA (0.1%)	6.07	0.99	0.7806
T7: EM (5) + LC (20%) + EDTA (0.1%)	5.77	1.00	0.9318
T8: TESTIGO	6.36	0.85	0.2333

Fuente: elaboración propia

Como el p-valor, es mayor que el nivel de significación ($\alpha > 0.05$), se acepta Ho y se rechaza Ha, indicando que la población, de donde proviene la muestra, está distribuida normalmente. Los datos se presentan en la tabla 32.

Se aplicó el análisis de variancia, para determinar la significación entre tratamientos, planteándose la siguiente hipótesis:

Ho: los tratamientos son iguales estadísticamente

De los resultados de la prueba de Duncan, se acepta H_0 , sobresaliendo los tratamientos EDTA y EM + EDTA, con valores de 6.64 y 6.66, respectivamente, menores al contenido de inicial de Cd en el suelo que fue de 8.77 mg/kg, indicando que hay una disminución de Cd en el suelo. Esto valida la hipótesis planteada.

4.3 Discusión de resultados

La concentración de cadmio en la parte aérea fue significativamente superior en el tratamiento con lombricompost al (20)% y EDTA al (0.1)%, lo cual se atribuye al efecto favorable del abono orgánico en mejorar las propiedades del suelo, y del quelato en atrapar los iones cadmio en solución, y ambos efectos facilitaron la absorción de este metal pesado.

Estos datos son similares a lo reportado en el trabajo de investigación de un suelo altamente contaminado con Cd (15 ppm), donde agregó 1 g EDTA/kg de suelo en *Corrigiola telephifolia* y *Agrostis castellana*, donde la acumulación de Cd en la parte aérea fue mayor con EDTA que con DTPA (17). Asimismo, al aplicar compost de biosólidos (30 t/ha) en un suelo con plantas de *Paulownia fortunei*, se concluyó que las enmiendas disminuyeron la disponibilidad de contaminantes en el suelo, atribuible a la presencia de la planta (18).

El efecto se explica, debido a que las enmiendas orgánicas asisten a la fitorremediación, incrementando la formación que complejos metales-quelatos y mejoran la traslocación de los metales absorbidos (66).

El contenido de Cd en la parte radicular no tuvo diferencias significativas entre los tratamientos, con una variación entre 1.39 mg/kg (testigo) y 2.28 (EM 5%+LC 20%), pero inferior al contenido en la parte aérea (2.85 mg/kg y 5.25 mg/kg). Entonces, se tuvo el siguiente orden de acumulación de Cd en la planta: parte aérea > parte radicular.

Debemos agregar que la fitorremediación puede alcanzarse a través de la inactivación o inmovilización de contaminantes en las raíces, en función de la disponibilidad de contaminantes en el suelo (58).

La materia seca formada fue mayor en el tratamiento con lombricompost al 20%, superando significativamente al testigo, indicando el efecto de esta enmienda orgánica en incrementar el crecimiento y formación de materia seca de *Cyperus rotundus L.*, a través de la mejora en las propiedades del suelo y la actividad microbial.

La formación de biomasa juega un rol crítico en la eficiencia de la fitorremediación, lo cual es afectado por factores como el contenido de materia orgánica (por ejemplo,

lombricompost) y enmiendas que se apliquen al suelo (56).

El compost enriquece el suelo con alto contenido orgánico lo cual estimula el crecimiento de la planta y contribuye a disminuir los efectos tóxicos de los contaminantes (67).

No hubo efecto significativo de las enmiendas orgánicas en el contenido de materia seca de la parte radicular, indicando un crecimiento similar con y sin enmienda orgánica, lo cual caracteriza a una planta tolerante como *C. rotundus* que crece en un suelo contaminado.

El factor de bioconcentración de la parte aérea fue significativamente superior con los tratamientos de lombricompost + EDTA y microorganismos eficaces + EDTA; lo cual corrobora las investigaciones realizadas con EDTA, que es un agente quelatante efectivo en el proceso de fitoextracción (66).

El factor de bioacumulación fue menor que la unidad en todos los tratamientos. Con un rango entre 0.87 y 0.43, y si esto es relacionado al factor de traslocación > 1 , estaríamos frente a una planta fitoextractora (87).

Es decir, el "*C. rotundus*" absorbió cadmio por las raíces, seguido de su traslocación a la parte aérea; los investigadores mencionan que la absorción de metales es seguida por la formación de complejos metal-fitoquelatina o complejo metal-ligante. Los metales absorbidos son acumulados en la vacuola, pared celular y otras partes de los tejidos de las plantas (57).

El factor de bioconcentración en la parte radicular y total, no fue significativamente diferente en los tratamientos aplicados, con un rango entre 0.22 a 0.40. Lo que indica que los tratamientos no hicieron variar la acumulación de Cd en las raíces y en toda la planta.

El factor de traslocación fue significativamente superior en el tratamiento control o testigo, que no recibió enmiendas, lo cual evidencia un rápido transporte de la raíz a la parte aérea, cuando no se aplican materiales orgánicos. Este resultado contradice las informaciones publicadas, que mencionan que la fitorremediación asistida con enmiendas y microorganismos mejoran la traslocación de metales en las plantas, entre otros efectos favorables (66).

Son entonces, las interacciones suelo-planta, y el metabolismo de la planta que determina la eficiencia de la fitorremediación, lo cual es afectado por el Ph del suelo,

conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, procesos microbiales y la aplicación de enmiendas orgánicas (56).

La concentración final de cadmio en el suelo fue significativamente menor con el tratamiento de lombricompost al (20)%. Los tratamientos de EDTA y EDTA conjuntamente con microorganismos eficaces (EM por sus siglas en inglés) lograron los más altos valores, debido a su papel en suelos contaminados en movilizar elementos pesados y facilitar su absorción por las plantas, especialmente en plantas hiperacumuladoras (66). En este experimento la planta de "C. rotundus" es calificada como fitoextractora y no hiperacumuladora, por lo que, al solubilizarse el Cd con el EDTA, se incrementó su contenido en el suelo.

El efecto del lombricompost se sustenta en la regulación de la disponibilidad y movilidad de metales pesados mediante la adsorción sobre las partículas del suelo, y complejación con otros minerales, así como la precipitación de elementos altamente móviles y reacciones redox (67).

Si calculamos la disminución de concentración de Cd en el suelo con el tratamiento 2 de LC (20%), que fue el que tuvo más baja concentración al finalizar el experimento, resulta en 54,67% .

CONCLUSIONES

1. El lombricompost a una dosis del 20% junto con el EDTA a una concentración del 0.1% incrementaron la concentración de Cd en la parte aérea de *Cyperus rotundus* L.
2. No se observó diferencias significativas en la acumulación de Cd en la parte radicular de *Cyperus rotundus* L., debido a la aplicación de enmiendas orgánicas.
3. El lombricompost incrementó significativamente la materia seca aérea en la planta de "C. rotundus" No se observó diferencias significativas en la materia seca radicular.
4. El factor de bioacumulación de la parte aérea fue significativamente superior en los tratamientos de EDTA+LC y EDTA+EM, evidenciando el efecto quelatante del EDTA con el Cd.
5. Los factores de bioacumulación en raíces y el total (aérea + raíces) no presentó diferencias significativas, en los tratamientos estudiados.
6. El factor de traslocación fue mayor que 1 en todos los tratamientos y significativamente superior en el tratamiento testigo al que no se aplicó enmiendas.
7. El tratamiento 2 que redujo significativamente el contenido de Cd en el suelo, en un promedio de 54.67%, fue el lombricompost a una dosis de 20%.

RECOMENDACIONES

1. Realizar investigaciones de fitorremediación considerando la bioestimulación, con el fin de incrementar la eficiencia.
2. Los ensayos con enmiendas orgánicas para remediar suelos contaminados con metales pesados deben realizarse en diferentes especies vegetales y tipos de suelos contaminados.
3. Relacionar los indicadores de fitorremediación con las propiedades de los suelos contaminados.
4. Utilizar en otros trabajos de investigación de fitorremediación, el lombricompost en diferentes dosis, por haber sido el tratamiento con mayor significación en esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MARRERO-COTO, J., AMORES-SÁNCHEZ, I., y COTO-PÉREZ, O. Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*, 46(3): 52-61. 2012. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223124988007.pdf>
2. KUBIER, A., WILKIN, R., and PICHLER, T. Cadmium in soils and groundwater: A review. *Applied Geochemistry* 108. 2019. https://www.academia.edu/64645830/Cadmium_in_soils_and_groundwater_A_review
3. CARRILLO-GONZÁLES, R., PEREA-VÉLIZ, Y., y GONZALES-CHÁVEZ, M. Fitorremediación asistida con enmiendas y fitoestabilización de elementos potencialmente tóxicos. *Agroproductividad* 10(4): 15-20. 2017. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/990>
4. PADMAVATHIAMMA, P.; y LI, L. Phytoremediation Technology: Hyper – accumulation Metals in Plants. *Water, Air, & Soil Pollution*. 184: 105 – 126. 2007. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-007-9401-5>
5. REICHENAUER, T. and GERMIDA, J. Phytoremediation of organic contaminants in soil and groundwater. *ChemSusChem*. 1: 708 – 717. 2008. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18698569/>
6. DELGADILLO – LOPEZ, A.; GONZÁLES – RAMÍREZ, C.; PRIETO – GARCÍA, F.; VILLAGOMEZ – IBARRA, J.; and ACEVEDO – SANDOVAL, O. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14: 597 – 612. 2011. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002
7. NÚÑEZ LÓPEZ, R.; MEAS VONG, Y.; ORTEGA BORGES, R. y OLGUÍN, E. Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Ciencia* 55(3): 69-83. 2004. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf
8. HOUBEN, D., PIRCAR, J., and SONNET, P. Heavy metal immobilization by cost – effective amendments in a contaminated soil. Effects on metal leaching and phytoavailability. *Journal of Geochemical Exploration* 123: 87 – 94. 2012. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375674211002081>

9. TEJADA T. 2013. Rendimiento y calidad: uso de enmiendas orgánicas. [En línea] Available at: <https://docplayer.es/42266787-Rendimiento-y-calidad-uso-de-enmiendas-organicas.html>.
10. CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL. *El coquito (Cyperus rotundus L.): Biología, manejo y control*. Colombia. CIAT 71 P. (1988).
11. MAGUIÑA C. Determinación de la capacidad fitorremediadora de *Lupinus mutabilis* Sweet "chocho" o "tarwui" en suelos contaminados con cadmio (Cd). Tesis para optar el Título Profesional de Licenciada en Biología. Universidad Ricardo Palma. Lima, Perú. 2017. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/urp/910>
12. CHÁVEZ L. Fitorremediación con especies nativas en suelos contaminados con plomo. Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima. 2014. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1369852>
13. RODRIGO J. Capacidad fitorremediadora de la especie *Helianthus annuus* mediante la incorporación de enmiendas a suelos contaminados por metales pesados (plomo, cromo) de industrias metalmeccánicas. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniera Ambiental. Universidad Peruana Unión. Lima, Perú. 2018. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/1297>
14. JARA, E. Evaluación de *Lupinus condensiflorus* C.P.Sm., *L. Ballianus* C.P. Sm. y *Astragalus garbancillo* Cav. (Fabaceae) en la restauración de suelos que contiene plomo, cadmio y zinc. Tesis para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. 2018. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/9406/Jara_pe.pdf?sequence=3&isAllowed=y
15. PAPUICO, K. Técnica de fitorremediación en la extracción de metales pesados con la planta Yaluzai (*Senecio rudbeckiaefolius*) en la relavera de Quiulacocho del distrito de Simón Bolívar de Rancas. Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Cerro de Pasco. Perú. 2018. <http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/457/1/TESIS%20KARITO.pdf>
16. OBESO, A., CASTILLO, A., GURREONERO, J., y VEJARANO, R. Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados mediante cultivo de geranio (*Pelargonium zonale*). VIII Encuentro Científico Internacional del Norte. Investigación y Publicación para el Desarrollo Sostenible. 2017.

- https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/9832/ECI%202017%20-%20geranio_Articulo_REPOSITORIO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
17. PASTOR, J.; MARTÍN – APARICIO, A.; GUTIERREZ- MAROTO, A.; HERNÁNDEZ, A. Efecto de la aplicación de dos sustancias quelantes (EDTA y DTPA) sobre la vegetación autóctona en un suelo contaminado de Cu, Zn y Cd. En: Jiménez – Ballesta, R.; Alvarez – Gonzáles, A.M. (eds.). Control de la degradación de Suelos: 431 – 436. I.S.B.N. 84-689 – 2620 – 5. <https://digital.csic.es/handle/10261/50767>
 18. XIONG, J. Recuperación y rehabilitación de suelos contaminados con elementos traza mediante la aplicación de enmiendas y el establecimiento de una cubierta vegetal natural o de una planta de crecimiento rápido (*Paulownia fortunei*). Tesis para optar el Grado de Doctor. Universidad de Sevilla. 2015. <https://core.ac.uk/download/pdf/51402578.pdf>
 19. LI, X., LI, Y., ZHU, X., GUI, X., MA, C., PENG, W., LI, Y., ZHANG, Y., HUANG, W., HUA, D., JIA, S., and WU, M. Evaluation of the cadmium phytoextraction potential of tobacco (*Nicotiana tabacum*) and rhizosphere micro-characteristics under different cadmium levels. *Chemosphere* 286(2), 131714. 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004565352102186X>
 20. CAO, X., WANG, X., LU, M., HAMID, Y., LIN, Q., LIU, X., LI, T., LIU, G., HE, Z. and YANG, X. The Cd phytoextraction potential of hyperaccumulator *Sedum alfredii*-oilseed rape intercropping system under different soil types and comprehensive benefits evaluation under field conditions. *Environmental Pollution*. 285: 117504. 2021. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0269749121010861?token=4DE6CA87EAF22BDD7944C5148A940FBE4E0C6B0E4139813C4362F1D100083CCD386E5DCAFBB69BF3B94B18FCDA9CBDDE&originRegion=us-east-1&originCreation=20220416043455>
 21. YU, F., TANG, S., SHI, X., LIANG, X., LIU, K., HUANG, Y., and LI, Y. Phytoextraction of metal(loid)s from contaminated soils by six plant species: A field study. *Science of the Total Environment*. 804: 150282. 2022. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0048969721053596?token=32241CF7BF899356E247B8725A2DB45CD964DF119E01AE352C04B6618683BBE16E016F01BB99167A7AC96A3E246A47BD&originRegion=us-east-1&originCreation=20220416050803>

22. GUO, D., ALI, A., REN, C., DU, J., LI, R., LAHORI, A., XIAO, R., ZHANG, Z., and ZHANG, Z. EDTA and organic acids assisted phytoextraction of Cd and Zn from a smelter contaminated soil by potherb mustard (*Brassica juncea*, Coss) and evaluation of this bioindicators. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 167: 396-403. 2019.
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0147651318310418?token=E32BA380F126950C0B37F263F3113C23A08BDC160C023813BD5641AE1D08013F9C07890A800215F098CB4CECE3FC4D5A&originRegion=us-east-1&originCreation=20220416053552>
23. NIES, D. Efflux mediated heavy metal resistance in prokaryotes. *FEEMS Microbiol. Rev.* 27, 313-339. 2003.
<https://academic.oup.com/femsre/article/27/2-3/313/615199>
24. THORNTON, I. Geochemistry of cadmium. In: Mislin, H., Ravera, O (Eds.), *Cadmium in the Environment*. Birkhaeuser, Basel, Boston, Stuttgart, pp. 7-12. 1986.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-0348-7238-6_1#:~:text=Cadmium%20is%20mainly%20found%20in,air%2C%20plant%20and%20animal%20tissues.
25. HAJEB, P., SLOTH, J., SHAKIBAZADEH, S., MAHYUDIN, N., AFSAH-HEJRI, L. Toxic elements in food: occurrence, binding, and reduction approaches. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 13, 457-472. 2014.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33412705/>
26. SMOLDERS, E., and MERTENS, J. Cadmium. In: Alloway, J. (Ed.), *Heavy Metals in Soils – Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability*, 3 ed. Springer, Dordrecht, pp. 283-299. 2013.
27. NASSEM, S., HAMZA, S., NAWAZ-UL-HUDA. S., BASHIR, E., UL-HAQ, Q. Geochemistry of Cd in Grounwater og winder, Balochistan and suspected health problems. *Environ. Earth Sci.* 71, 1683-1690. 2014.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-013-2572-z>
28. SIX, L., and SMOLDERS, E. Future trends in soil cadmium concentration under current cadmium fluxes to European agricultural soils. *Sci. Total Environ.* 485, 319-328. 2014. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24727598/>
29. TAYLOR, M., KIM, N., SMIDT, G., BUSBY. C., NcNALLY, S., ROBINSON, B., KRATZ, S., and SCHUNG, E. Trace element contaminats and radioactivity from phosphate fertilizer. In: Schung, E., De Kok, L. (Eds.), *Phosphorus in agriculture: 100% Zero*. Springer, Dordrecht, PP. 231-266. 2016.

30. LABO. Background values for inorganic and organic parameters in soil. In: Working Group of the Federal States on Soil Protection, 4 ed. Pp. 41. 2017.
31. MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo. Decreto Supremo N° 011-2017. Ministerio del Ambiente, Lima, Perú. 2017.
32. AKBAR, K., HALE, W., HEADLEY, A., and ATHAR, M. Heavy metal contamination of roadside soils of northern England. *Soil Water Res.* 158-163. 2006. <https://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/82033.pdf>
33. JOIMEL, S., CORTET, J., JOLIVET, C., SABY, N., CHENOT, S., BRANCHU, P., CONSALES, J., LEFORT, C., MOREL, J., and SCHWARTZ, C. Physico-chemical characteristics for contrasted forest, agricultural, urban and industrial land uses in France. *Environ.* 545, 40-47. 2016. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26745291/>
34. BIGALKE, M., ULRICH, A., REHMUS, A., and KELLER, A. Accumulation of cadmium and uranium in arable soils in Switzerland. *Environ. Pollut.* 221, 85-93. 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749116307990>
35. KUBIER, A., WILJIN, R., and PICHLER, T. Cadmium in soils and groundwater: A review. *Applied Geochemistry* 108: 104388. 2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292719301805>
36. CLOQUET, C., CARIGNAN, J., LIBOUREL, G., STERCKMAN, T., and PERDRIX, E. Tracing source pollution in soils using cadmium and lead isotopes. *Environ. Sci. Technol.* 40, 2525-2530. 2006.
37. ATSDR. A toxicological profile for cadmium. Agency for toxic substances and disease registry, Atlanta, pp. 430. 2012.
38. BELON, E., BOISSON, M., DEPORTES, I., EGLIN, T., FEIX, I., BISPO, A., GALSOMIES, L., LEBLOND, S., and GUELLIER, C. An inventory of trace elements inputs to French agricultural soils. *Sci. Total Environ.* 439, 87-95. 2012. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969712012028>
39. KABIR, E., RAY, S., KIM, K., YOON, H., JEON, E., KIM, Y., CHO, Y., YUN, S., and BROWN, R. Current status of trace metal pollution in soils affected by industrial activities. *Sci. World J.* 2012. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22645468/>
40. LOGANATHAN, P., VIGNESWARAN, S., KANDASAMY, J. and NAIDU, R. Cadmium sorption and desorption in soils: a review. *Crit. Rev. Environ. Sci.*

- Technol.* 42, 489-533. 2012.
https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/3342936
41. AHMED, I., CROUT, N., and YOUNG, S. Kinetics of Cd sorption, desorption and fixation by calcite: a long-term radiotracer study. *Geochem. Cosmochim. Acta* 72, 1498-1512. 2008.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016703708000203>
 42. AL HUSSEINI, A., BECHET, B., GAUDIN, A., and RUBAN, V. Trace metal fractionation as a mean to improve on the management of contaminated sediments from runoff water in infiltration basins. *Environ. Technol.* 34, 1255-1266. 2013.
https://www.researchgate.net/publication/258313135_Trace_metal_fractionation_as_a_mean_to_improve_on_the_management_of_contaminated_sediments_from_runoff_water_infiltration_basins
 43. LIU, Y., XIAO, T., PERKINS, R., ZHU, J., ZHU, Z., XIONG, Y., and NING, Z. Geogenic cadmium pollution and potential health risks, with emphasis on black shale. *J. Geochem. Explor.* 176, 42-49. 2017.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375674216300929>
 44. TABELIN, C. IGARASHI, T., VILLACORTE-TABELIN, M., PARK, I., OPISO, E., ITO, M., and HIROYOSHI, N. Arsenic, selenium, boron, lead, cadmium, copper, and zinc in naturally contaminated rocks: a review of their sources, modes of enrichment, mechanisms of release, and mitigation strategies. *Sci. Total Environ.* 645, 1522-1553. 2018. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30248873/>
 45. KARLSSON, T., ELGH-DALGREN, K., BJORN, E., and SKYLLBERG, U. Complexation of cadmium to sulfur and oxygen functional groups in an organic soil. *Geoch. Cosmochim. Acta.* 71, 604-614. 2007.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007GeCoA..71..604K/abstract>
 46. KAISER, K. and GUGGENBERGER, G. Dissolved organic Sulphur in soil water under *Pinus sylvestris* L. and *Fagus sylvatica* L. stands in northeastern Bavaria, Germany-variations with seasons and soil depth. *Biogeochemistry* 72, 337-364. 2005. <https://www.jstor.org/stable/20055176>
 47. KOZYATNYK, I., BOUCHET, S., BJORN, E., HAGLUN, P. Fractionation and size-distribution of metal and metalloid contaminants in a polluted groundwater rich in dissolved organic matter. *J. Hazard Mater.* 318, 194-202. 2016.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27427886/>
 48. LIN, Z., SCHNEIDER, A., STERCKEMAN, T., and NGUYEN, C. Ranking of

- mechanisms governing the phytoavailability of cadmium in agricultural soils using a mechanistic model. *Plant Soil* 399, 89-107. 2016. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01260301>
49. ANDERSON, P. and CHRISTENSEN, T. Distribution coefficients of Cd, Co, Ni and Zn in soils. *J. Soil Sci.* 39, 15-22. 1988. <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2389.1988.tb01190.x>
 50. ASHRAF, S., ALI, Q., ZAHIR, Z., ASHRAF, S., and ASGHAR, H. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 174, 714–727. 2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651319302271>
 51. PIVETZ, B. Phytoremediation of contaminated soil and ground water at hazardous waste sites. *US Environmental Protection Agency.*, 2001. <https://www.epa.gov/remedytech/phytoremediation-contaminated-soil-and-ground-water-hazardous-waste-sites>
 52. SHABANI, N., SAYADI, M. Evaluation of heavy metals accumulation by two emergent macrophytes from the polluted soil: an experimental study. *Environment.* 32, 91–98. 2012. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10669-011-9376-z>
 53. WEI, Z., VAN LE, Q., PENG, W., YANG, Y., YANG, H., GU, H., LAM, S., SONNE, C. A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil. *J. Hazard. Mater.* 403, 123658. 2021. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33264867/>
 54. ANTONIADIS, V., LEVIZOU, E., SHAHEEN, S., OK, Y., SEBASTIAN, A., BAUM, C., PRASAD, M., WENZEL, W., RINKLEBE, J. Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation—a review. *Earth Sci. Rev.* 171, 621–645. 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825216303518>
 55. DARY, M., CHAMBER-PÉREZ, M., PALOMARES, A., PAJUELO, E. “In situ” phytostabilisation of heavy metal polluted soils using *Lupinus luteus* inoculated with metal resistant plant-growth promoting rhizobacteria. *J. Hazard. Mater.* 177, 323–330. 2010. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389409020068>
 56. NISSIM, W., PALM, E., MANCUSO, S., AZZARELLO, E. Trace element phytoextraction from contaminated soil: a case study under Mediterranean climate. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 9114–9131. 2018.

- <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29340860/>
57. LAJAYER, B., MOGHADAM, N., MAGHSOODI, M., GHORBANPOUR, M., KARIMAN, K. Phytoextraction of heavy metals from contaminated soil, water and atmosphere using ornamental plants: mechanisms and efficiency improvement strategies. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26, 8468–8484. 2019.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30712209/>
58. LI, H., SHENG, G., SHENG, W., XU, O. Uptake of trifluralin and lindane from water by ryegrass. *Chemosphere* 48, 335–341. 2002.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653502000930>
59. INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL. *Phytotechnology technical and regulatory guidance and decision trees (revised)*. 1-131, 2009.
<https://connect.itrcweb.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=9d763797-c32e-4f2b-8e07-ed81b323245c>.
60. HAMMOND, C., ROOT, R., MAIER, R., CHOROVER, J. Mechanisms of arsenic sequestration by *Prosopis juliflora* during the phytostabilization of metalliferous mine tailings. *Environ. Sci. Technol.* 52, 1156–1164. 2018.
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b04363>
61. JADIA, C., FULEKAR, M. Phytoremediation of heavy metals: recent techniques. *Afr. J. Biotechnol.* 8.2009. <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/59987>
62. MITHEMBU, M. Nitrogen and phosphorus removal from agricultural wastewater using constructed rhizofiltration in Durban, South Africa. *J. Agricul. Sci. Technol.* 1142–1148. 2012.
63. LIMMER, M., BURKEN, J. Phytovolatilization of organic contaminants. *Environ. Sci. Technol.* 50, 6632–6643. 2016.
[https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27249664/#:~:text=Abstract,root%20activities%20\(indirect%20phytovolatilization\)](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27249664/#:~:text=Abstract,root%20activities%20(indirect%20phytovolatilization)).
64. LI, H., SHENG, G., SHENG, W., XU, O. Uptake of trifluralin and lindane from water by ryegrass. *Chemosphere* 48, 335–341. 2002.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653502000930>
65. GARRISON, A., NZENGUNG, V., AVANTS, J., ELLINGTON, J., JONES, W., RENNELS, D., WOLFE, N. Phytodegradation of p, p'-DDT and the Enantiomers

- of o, p '-DDT. *Environ. Sci. Technol.* 34, 1663–1670. 2000. https://www.researchgate.net/publication/313840326_Phytodegradation_of_pp'-DDT_and_the_Enantiomers_of_op'-DDT.
66. KAFLE, A., TIMILSINA, A., GAUTAM, A., ADHIKARI, K., BHATTARAI, A., and ARYAL, N. Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances* 8: 1-18. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666765722000394>
 67. RESHMA A., and KRISHNA R. Biomass and chemical amendments for enhanced phytoremediation of mixed contaminated soils, *Ecol. Eng.* 85: 265–274. 2015. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857415301646>
 68. JIANG, M., LIU, S., LI, Y., LI, X., LUO, Z., SONG, H., CHEN, Q. EDTA-facilitated toxic tolerance, absorption and translocation and phytoremediation of lead by dwarf bamboos. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 170, 502–512. 2019. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30557708/>
 69. AWOKUNMI, E., ASAOLU, S., AJAYI, O., ADEBAYO, O. The role of EDTA on heavy metals phytoextraction by *Jatropha gossypifolia* grown on soil collected from dumpsites in Ekiti state Nigeria. *British J. Environ. Clim. Change* 2, 153 2012. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/sea-162580>
 70. EVANGELOU, M., EBEL, M., SCHAEFFER, A. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. *Chemosphere* 68, 989–1003. 2007. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653507001828>.
 71. GOSWAMI, M., CHAKRABORTY, P., MUKHERJEE, K., MITRA, G., BHATTACHARYYA, P., DEY, S., TRIBEDI, P. Bioaugmentation and biostimulation: a potential strategy for environmental remediation. *J Microbiol Exp* 6, 223–231. 2018. <https://medcraveonline.com/JMEN/bioaugmentation-and-biostimulation-a-potential-strategy-for-environmental-remediation.html#:~:text=The%20addition%20of%20rate%20limiting,significantl y%20accelerates%20the%20decontamination%20rate.&text=Among%20all%20 of%20the%20bioremediation,method%20for%20remediation%20of%20hydroca rbons>.
 72. GILL, R., AHMAR, S., ALI, B., SALEEM, M., KHAN, M., ZHOU, W., LIU, S. The Role of Membrane Transporters in Plant Growth and Development, and Abiotic

- Stress Tolerance. *Int. J. Mol. Sci.* 22, 12792. 2021.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34884597/>
73. MA, Y., PRASAD, M., RAJKUMAR, M., FREITAS, H. Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. *Biotechnol. Adv.* 29, 248–258. 2011. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21147211/>
 74. LEIHNER, D., DOLL, J., y FUENTES DE PEDRAHÍTA, C. El coquito (*Cyperus rotundus* L.): Biología, manejo y control. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia. 1988.
 75. MINAM. Glosario de términos. Sitos Contaminados. Ministerio del Ambiente, Lima, Perú. 2016. Consulta: [24 de setiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2015/02/2016-05-30>
 76. SANCHEZ - LOPEZ, A.; GONZALES – CHAVEZ, M.; y CARRILLO – GONZALES, R. Absorber, inmovilizar o atrapar. Funciones de las plantas en la remediación de sitios contaminados por elementos potencialmente tóxicos. *Agroproductividad*: Vol 10, Num. 4, abril. Pp. 80 – 86. 2017. [fecha de consulta: 22 de setiembre de 2021]. Disponible en: <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1007/861>
 77. VIGOSA – MERCADO, J.; y FONSECA, R. Una nueva especie de Muhlenbergia (Poaceae, Chloridoideae, Cynodonteae) del estado de Guerrero, México. 2019. *Acta Botánica Mexicana* 126: e1464. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-71512019000100128
 78. BERNAL C.A. Metodología de la Investigación. Administración, Economía, Humanidades y Ciencias Sociales. Tercera edición. Pearson. Colombia. 2010.
 79. USEPA 305 A. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, and soils. 1998.
 80. SKOOG D., HOLLER F., CROUCH S. Principios de análisis instrumental. 6ta edición, Cengage Learning, México. 2001.
 81. ARROYO, J. ¿Cómo ejecutar un plan de investigación?. Fundación para el Desarrollo de las Ciencias. 2012
 82. STEEL, R. y TORRIE, J. Bioestadística: principios y procedimientos. Segunda edición. McGraw – Hill. Madrid. 1985. ISBN: 9684514956.
 83. MINAM. Guía para el muestreo de suelos. Ministerio del Ambiente. Dirección

- General de Calidad Ambiental. 2014.
84. CAO, X., WANG, X., TONG, W., GURAJALA, H., LU, M., HAMID, Y., FENG, Y., HE, Z., and YANG, X.E. Distribution, availability and translocation of heavy metals in soil-oilseed rape (*Brassica napus* L.) system related to soil properties. *Environ. Pollut.* 252, 733–741. 2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749119303008>
 85. BALZARINI M., GONZALEZ L., TABLADA M., CASANOVES F., DI RIENZO J., and ROBLEDO C. Infostat. *Manual del Usuario*. Editorial Brujas, Córdoba, Argentina. p. 80, 2008. https://www.researchgate.net/publication/283491340_Infostat_manual_del_usuario.
 86. USMAN, A., ALKREDAA, R., y AL-WABEL, M. Heavy metal contamination in sediments and mangroves from the coast of Red Sea: *Avicennia* sp. Marina as potential metal bioaccumulator. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 97:263-270. 2013. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24011858/>
 87. SOPYAN, R., and SUMARNI, N. Fitoakumulasi merkuri oleh akar tanaman bayam duri (*Amaranthus spinosus* Linn.) pada tanah tercemar. *Online Journal of Natural Science*. 3(1):31-39. 2014. <https://123dok.com/document/go3pwomq-fitoakumulasi-tanaman-amarantus-spinosus-tercemar-journal-science-technology.html>

ANEXOS

Anexo I. Análisis de suelo

ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : LUZ MILAGROS BENDEZÚ MONTALVÁN

Departamento : JUNÍN

Provincia : JAUJA

Distrito : SINCOS

Predio :

Referencia : H.R. 74107-032C-21

Bolt.: 4528

Fecha : 20/05/2021

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³ + H ⁺			
2796		7.57	0.56	10.20	2.80	35.3	140	67	25	8	Fr.A.	14.08	11.03	2.47	0.35	0.23	0.00	14.08	14.08	100

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

Número de Muestra		Cd ppm
Lab.	Claves	
2796		8.77



Ing. Braulio La Torre Martínez
Jefe del Laboratorio

INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : LUZ MILAGROS BENDEZÚ MONTALVÁN

PROCEDENCIA : JUNÍN/ HUANCAYO/ SINCOS

REFERENCIA : H.R. 76039

BOLETA : 4970

FECHA : 28/01/2022

Número Muestra		Cd
Lab	Claves	ppm
4817	1-I	6.32
4818	1-II	5.42
4819	1-III	7.10
4820	2-I	5.87
4821	2-II	5.35
4822	2-III	5.80
4823	3-I	6.45
4824	3-II	6.72
4825	3-III	6.75
4826	4-I	5.70
4827	4-II	6.02
4828	4-III	5.82
4829	5-I	6.60
4830	5-II	6.53
4831	5-III	6.55
4832	6-I	6.20
4833	6-II	6.05
4834	6-III	5.95
4835	7-I	5.85
4836	7-II	5.68
4837	7-III	5.77
4838	8-I	6.32
4839	8-II	6.30
4840	8-III	6.45

Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : LUZ MILAGROS BENDEZU MONTALVAN

PROCEDENCIA : JUNIN

MUESTRA : HOJAS Y RAICES COQUITO

REFERENCIA : H.R. 76040

BOLETA : 4970

FECHA : 11/01/2022

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm	N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
3098	1-I-H	3.51	3122	1-I-R	1.92
3099	1-II-H	2.62	3123	1-II-R	1.28
3100	1-III-H	2.80	3124	1-III-R	1.87
3101	2-I-H	3.41	3125	2-I-R	1.36
3102	2-II-H	3.05	3126	2-II-R	1.96
3103	2-III-H	3.85	3127	2-III-R	1.95
3104	3-I-H	4.52	3128	3-I-R	1.89
3105	3-II-H	3.59	3129	3-II-R	1.43
3106	3-III-H	4.15	3130	3-III-R	1.85
3107	4-I-H	6.48	3131	4-I-R	3.73
3108	4-II-H	3.55	3132	4-II-R	1.30
3109	4-III-H	3.07	3133	4-III-R	1.82
3110	5-I-H	3.38	3134	5-I-R	1.90
3111	5-II-H	2.54	3135	5-II-R	1.40
3112	5-III-H	2.64	3136	5-III-R	1.78
3113	6-I-H	4.63	3137	6-I-R	1.93
3114	6-II-H	4.81	3138	6-II-R	1.47
3115	6-III-H	6.32	3139	6-III-R	2.80
3116	7-I-H	5.06	3140	7-I-R	1.80
3117	7-II-H	5.46	3141	7-II-R	3.15
3118	7-III-H	3.99	3142	7-III-R	1.97
3119	8-I-H	4.67	3143	8-I-R	1.34
3120	8-II-H	4.35	3144	8-II-R	1.27
3121	8-III-H	5.20	3145	8-III-R	1.55

Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe de Laboratorio

Anexo II. Escala de interpretación de análisis de suelos

1. Textura¹

Términos Generales		Clase textural	Símbolo
Suelos	Textura		
Arenosos	Gruesa	Arena	A.
		Arena franca	A.Fr.
Francos	Moderadamente gruesa	Franco arenoso	Fr.A.
		Franco	Fr.
	Media	Franco limoso	Fr.L.
		Limoso	L.
	Moderadamente fina	Franco arcilloso	Fr.Ar.
		Franco arcillo limoso	Fr.Ar.L.
Franco arcillo arenoso		Fr.Ar.A.	
Arcillosos	Fina	Arcillo arenoso	Ar.A.
		Arcillo limoso	Ar.L.
		Arcilloso	Ar.

3. pH¹

Rangos	Clases
< 5,5	Fuertemente ácido
5,5 – 6,0	Moderadamente ácido
6,0 – 6,5	Ligeramente ácido
6,5 – 7,0	Neutro
7,0 – 7,8	Ligeramente alcalino
7,8 – 8,4	Medianamente alcalino
>8,4	Fuertemente alcalino

4. Conductividad eléctrica¹

Clase	Calificación	Conductividad	
		Eléctrica dS/m	
0	No salino	0 – 2	
1	Muy ligeramente salino	2 – 4	
2	Ligeramente salino	4 – 8	
3	Moderadamente salino	8 – 16	
4	Fuertemente salino	≥ 16	

5. Materia Orgánica²

Nivel	%
Bajo	□ 2
Medio	2 – 4
Alto	□ 4

6. Fósforo disponible²

Nive l	P (ppm)
Bajo	□ 7
Medio	7 - 14
Alto	□ 14

7. Potasio disponible²

Nivel	K (ppm)
Bajo	□ 100
Medio	100 – 240
Alto	□ 240

8. Capacidad de Intercambio Catiónico³

Nivel	CIC (meq/100 g)
Muy Baja	□ 4
Moderadamente Baja	4 – 8
Baja	8 – 12
Moderadamente Alta	12 – 20
Alta	□ 20

9. Saturación de bases³

Nivel	Suma de Cationes (%)	Acetato de Amonio (%)
Bajo	□ 35	□ 50
Alto	□ 35	□ 50

10. Calcáreo³

Nivel	% CaCO ₃
Bajo	□ 1
Medio	1 – 5
Alto	5 – 15
Muy alto	>15

(1) Soil Survey Division Staff. 2017. Soil Survey Manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.

(2) Reglamento de Clasificación de Tierras según su Capacidad de Uso Mayor, Lima, Perú.

(3) Departamento de Suelos y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria, La Molina 2002.

Anexo 3. Galería fotográfica



Punto de extracción del suelo



Secado del suelo al aire libre



Suelo tamizado para obtener una muestra de tierra más fina



Peso de suelo(TFSA) de 4 kg en una balanza digital con un adicional de 30 por el peso de la bolsa



Acido etilen diamino tetraacético



Suelo + 0.4g de EDTA



Vaciado de lombricompost



Lombricompost fino obtenido después de pasar por la malla cernidora



Suelo + 800 g de Lombricompost



Suelo homogenizado vaciado a una maceta



Macetas homogenizadas para cada tratamiento y con 2,5 L de agua agregado



Macetas drenadas después de 2 días



Plántulas de "C. rotundus" macetas



Trasplante de plantas de "C. rotundus" a macetas



Preparación de la activación (5 ml de EM+ 5ml de melaza + 90 ml de agua)



Plantas de "C. rotundus" después de los 3 meses de crecimiento



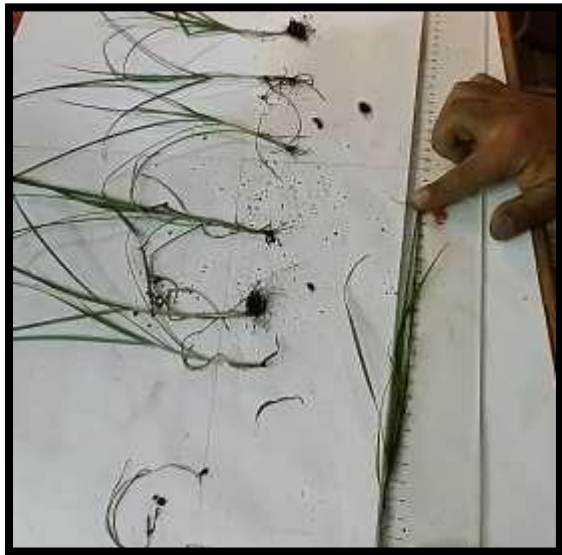
Separación de la tierra y la planta "C. rotundus" para realizar el conteo



Separación de la tierra y la planta "C. rotundus" para realizar el conteo



Conteo de todas las plantitas de "C. rotundus"



Medición de la longitud de la hoja de "C. rotundus" por cada muestra



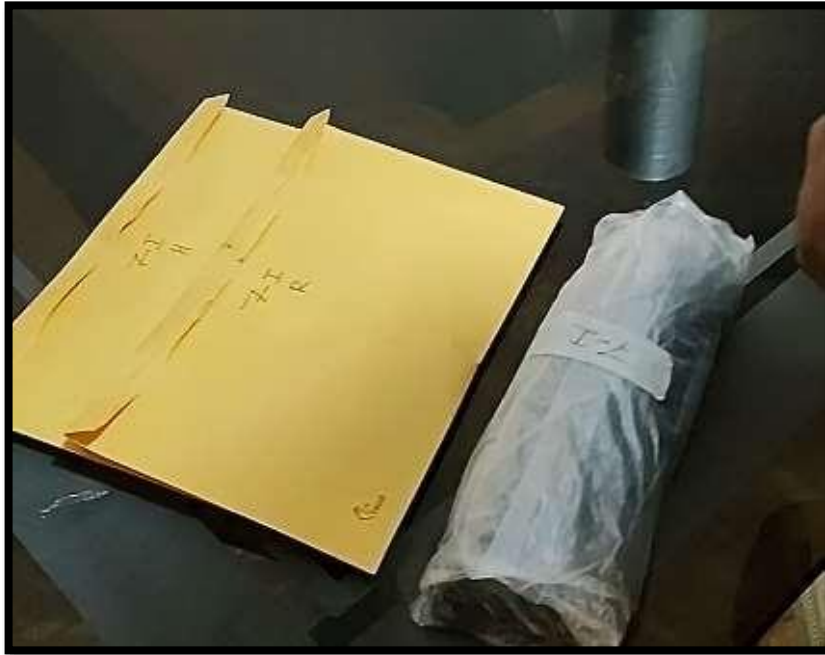
Medición de la longitud de la raíz de "C. rotundus" por cada muestra



Pesaje de raíz de "C. rotundus" obtenida por cada muestra



Pesaje de las hojas de "C. rotundus" obtenida por cada muestra

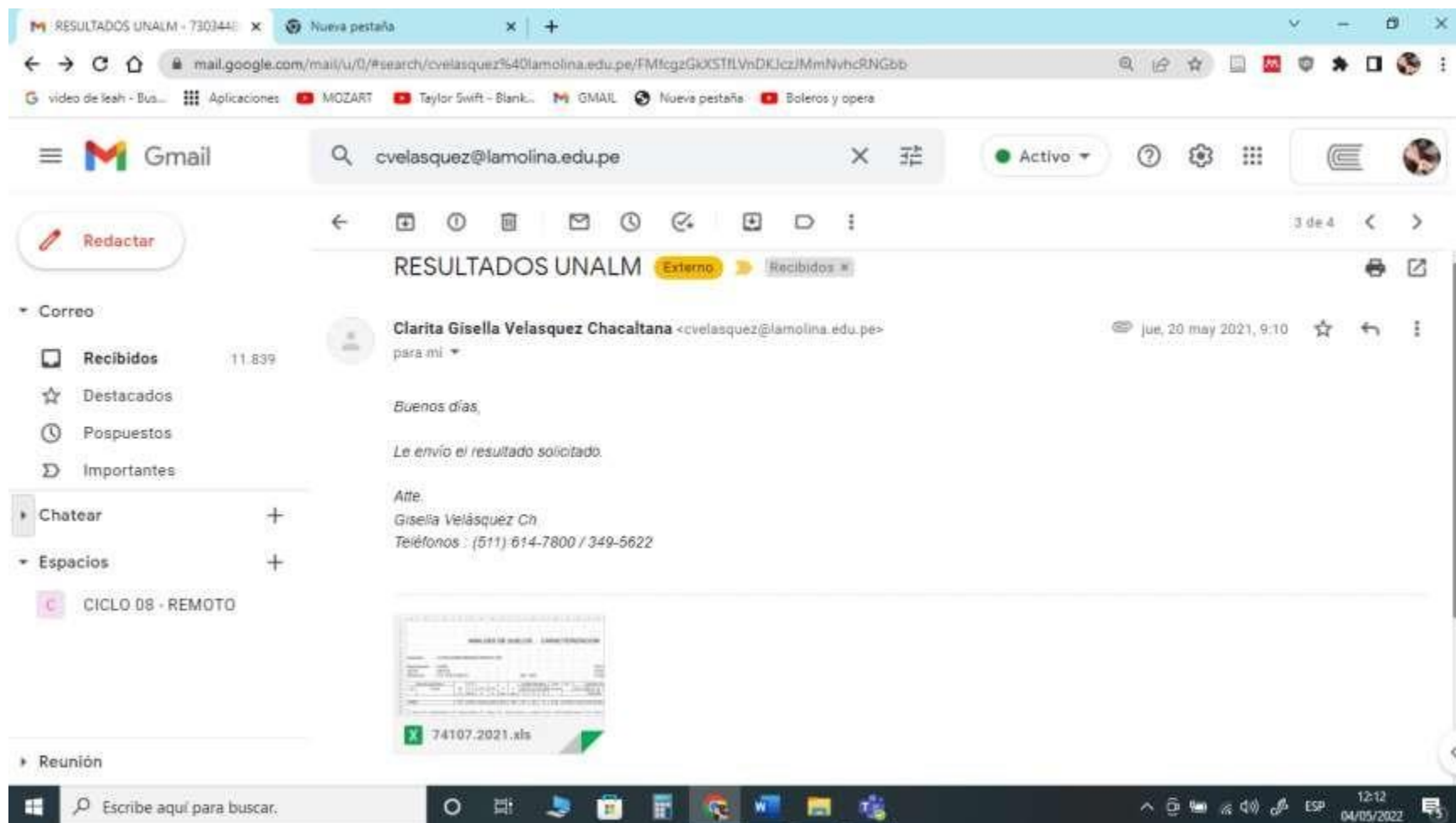


Rotulación y empaquetado de las muestras de la planta "C. rotundus" para el traslado a lima y posterior análisis de raíces y hojas



Control de datos de cada muestra analizada

Resultado de la caracterización de suelo recibido vía correo electrónico correspondiente en la fecha de 20 de mayo del 2021



74107.2021.xls Abrir con

ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : LUZ MILAGROS BENDEZÚ MONTALVÁN

Departamento : JUNÍN Provincia : JAUJA
 Distrito : SINCOS Predio :
 Referencia : H.R. 74107-032C-21 Bolt.: 4528 Fecha : 5/20/2021

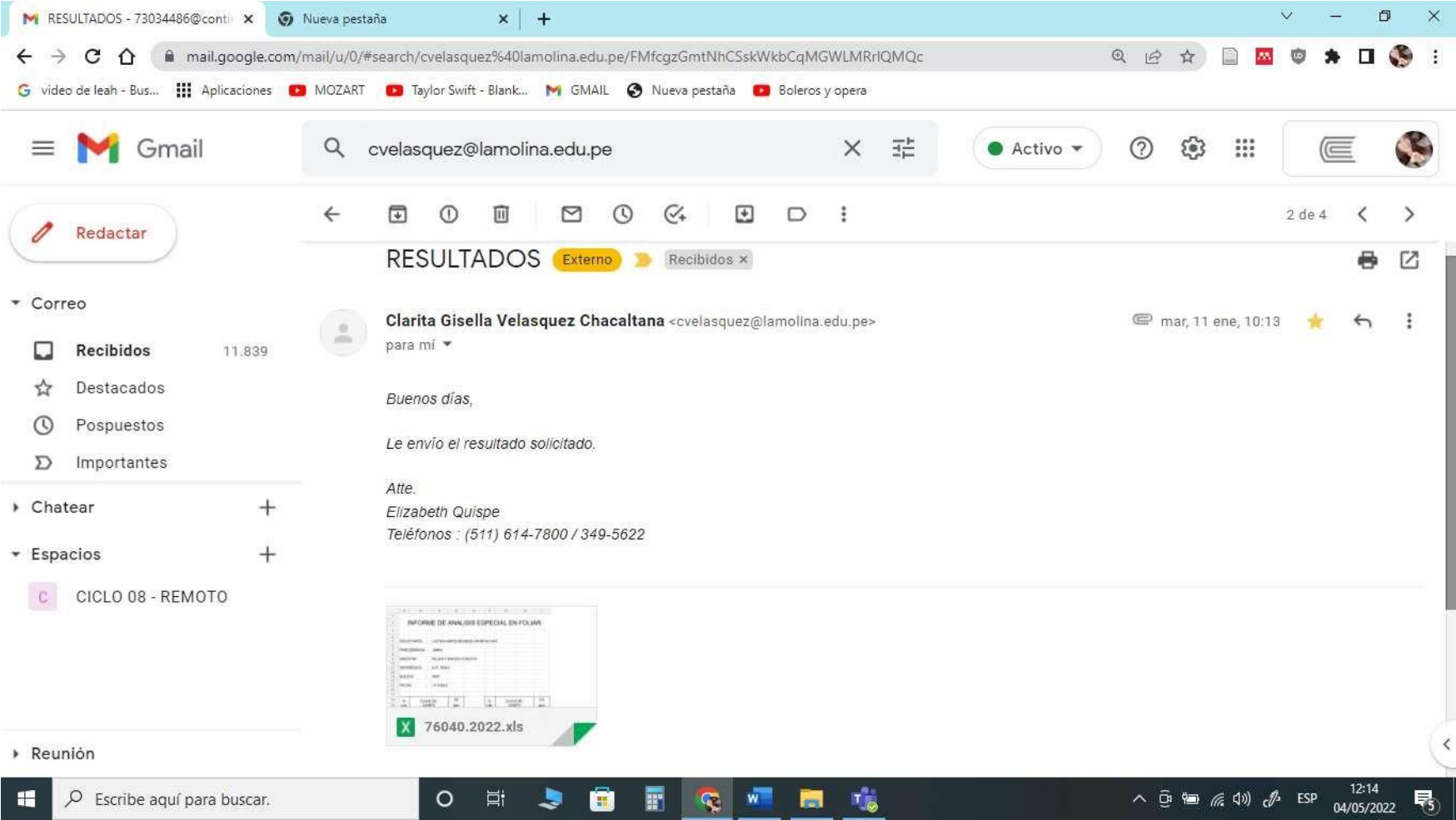
Número de Muestra		C.E.						Análisis Mecánico			Clase	CIC	Cationes Cambiables					Suma	Suma	%
Lab	Claves	pH	(1:1)	CaCO3	M.O.	P	K	Arena	Limo	Arcilla	Textural	Ca+2	Mg+2	K+	Na+	Al+3 + H+	de	de	Sat. De	
		(1:1)	dS/m	%	%	ppm	ppm	%	%	%		meq/100g					Cationes	Bases	Bases	
2796		7,57	0,56	10,20	2,80	35,3	140	67	25	8	Fr.A.	14,08	11,03	2,47	0,35	0,23	0,00	14,08	14,08	100

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

Número de Muestra		Cd
Lab.	Claves	ppm
2796		8,77

Ing. Braulio La Torre Martínez
Jefe del Laboratorio

Resultado del informe de análisis especial foliar recibido vía correo electrónico correspondiente en la fecha de 11 de enero del 2022



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR								
3									
4									
5	SOLICITANTE :	LUZ MILAGROS BENDEZU MONTALVAN							
6									
7	PROCEDENCIA :	JUNIN							
8									
9	MUESTRA :	HOJAS Y RAICES COQUITO							
10									
11	REFERENCIA :	H.R. 76040							
12									
13	BOLETA :	4970							
14									
15	FECHA :	1/11/2022							
16									
17									
18	N.	CLAVE DE	Cd			N.	CLAVE DE	Cd	
19	Lab.	CAMPO	ppm			Lab.	CAMPO	ppm	
20	3098	1-I-H	3,51			3122	1-I-R	1,92	
21	3099	1-II-H	2,62			3123	1-II-R	1,28	
22	3100	1-III-H	2,80			3124	1-III-R	1,87	
23	3101	2-I-H	3,41			3125	2-I-R	1,36	
24	3102	2-II-H	3,05			3126	2-II-R	1,96	
25	3103	2-III-H	3,85			3127	2-III-R	1,95	
26	3104	3-I-H	4,52			3128	3-I-R	1,89	
27	3105	3-II-H	3,59			3129	3-II-R	1,43	

2 de 4

az@lamolina.edu.pe>

mar 11 ene 10:13

Resultado del informe de análisis especial de suelo recibido vía correo electrónico correspondiente en la fecha de 28 de enero del 2022

The screenshot shows a Gmail interface in a browser window. The address bar displays the URL: `mail.google.com/mail/u/0/#search/cvelasquez%40lamolina.edu.pe/FMfcgzGmthgnDrkkgNrRrKvTDgBmvMpp`. The Gmail header shows the search bar with `cvelasquez@lamolina.edu.pe` and the status `Activo`. The email being viewed is from **Clarita Gisella Velasquez Chacaltana** (external recipient) with the subject **RESULTADOS UNALM**. The email content includes a greeting, a reference to a requested report, and contact information for Gisella Velásquez Ch. An Excel attachment titled **76039.2021.xls** is visible at the bottom of the email body. The left sidebar shows navigation options like **Redactar**, **Correo** (with 11,839 items), **Chatear**, **Espacios**, and **Reunión**. The Windows taskbar at the bottom shows the system tray with the date **04/05/2022** and time **12:15**.

76039.2021.xls

Abrir con

INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : LUZ MILAGROS BENDEZÚ MONTALVÁN

PROCEDENCIA : JUNÍN/ HUANCAYO/ SINCOS

REFERENCIA : H.R. 76039

BOLETA : 4970

FECHA : 1/28/2022

Número Muestra		Cd
Lab	Claves	ppm
4817	1-I	6,32
4818	1-II	5,42
4819	1-III	7,10
4820	2-I	5,87
4821	2-II	5,35
4822	2-III	5,80
4823	3-I	6,45
4824	3-II	6,72
4825	3-III	6,75
4826	4-I	5,70
4827	4-II	6,02

12:15 04/05/2022