



Universidad
Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Fitoestabilización de Cadmio por *Lupinus Mutabilis*
en un suelo contaminado del distrito El Mantaro,
Jauja 2016**

Siderlin Camila Hinostroza Zárate

Huancayo, 2018

Para optar el Título Profesional de
Ingeniera Ambiental



Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

A mis padres Pedro Hinostrza Castañeda e Iris Zárate Toribio, por enseñarme a luchar, ser humilde y tener respeto por los demás. Por el gran amor y cariño que demuestran a sus hijos. A mis hermanos Deyvis y Marco por todo el apoyo que me brindan. A mi hija Sophia que es mi motor y motivo para seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

- ξ AL Mg. Andrés Alberto Azabache Leyton por su valioso apoyo incondicional en calidad de asesor de la presente tesis.
- ξ A los ingenieros de la Escuela Académica de Ingeniería Ambiental que contribuyen en mi formación y desarrollo profesional.
- ξ Al personal que labora en el laboratorio de la Universidad Nacional Agraria la Molina por analizar las muestras iniciales de estiércol de lombriz, los análisis de caracterización del suelo y contenido de cadmio, así como también las muestras finales de análisis de cadmio en la planta y raíz.

ÍNDICE GENERAL

	Página
Portada.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Índice general.....	iv
Índice de tablas.....	vi
Índice de figuras.....	viii
Resumen.....	ix
Abstract.....	x
Introducción.....	xi
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	1
1.1 Planteamiento y formulación del problema.....	1
1.1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.1.2 Formulación del problema.....	3
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 General.....	3
1.2.2 Específicos.....	3
1.3 Justificación e importancia.....	3
1.3.1 Justificación de la investigación.....	3
1.3.2 Importancia de la investigación.....	4
1.4 Hipótesis.....	4
1.4.1 General.....	4
1.4.2 Específicas.....	4
1.5 Variables, operacionalización.....	5
1.5.1 Variable dependiente.....	5
1.5.2 Variable independiente.....	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Antecedentes del problema.....	7
2.2 Base teórica.....	12
2.2.1 La fitorremediación.....	12
2.2.2 La fitoestabilización.....	14
2.2.3 El cadmio en el suelo.....	15
2.3. Definición de términos básicos.....	17

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	19
3.1 Método y alcance de la investigación.....	19
3.1.1 Método general.....	19
3.1.2 Método específico.....	19
3.1.3 Alcance de la investigación.....	19
3.2 Diseño de la investigación.....	20
3.2.1 Diseño experimental.....	20
3.2.2 Caracterización del suelo contaminado.....	21
3.2.3 Conducción experimental.....	21
3.3 Población y muestra.....	22
3.3.1 Población.....	22
3.3.2 Muestra.....	22
3.4 Técnicas de recolección de datos.....	23
3.4.1 Instalación del experimento.....	23
3.4.2 Finalización del experimento.....	24
3.5 Técnicas de análisis de datos.....	24
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información.....	25
4.1.1 Análisis del suelo del experimento.....	25
4.1.2 Contenido de cadmio en la raíz.....	27
4.1.3 Contenido de cadmio en la parte aérea.....	30
4.1.4 Bioconcentración de cadmio en la raíz y en la parte aérea.....	40
4.1.5 Crecimiento de la planta de lupino.....	43
4.2 Discusión.....	48
4.2.1 Contenido de cadmio en la raíz.....	48
4.2.2 Contenido de cadmio en la parte aérea.....	49
4.2.3 Factor de bioconcentración.....	49
4.2.4 Crecimiento de lupino.....	50
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
Conclusiones.....	52
Recomendaciones.....	53
Referencias bibliográficas.....	54
ANEXOS.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
1. Tratamientos del estudio.....	21
2. Análisis físico-químico del suelo del experimento.....	23
3. Descripción del análisis de caracterización del suelo agrícola	25
4. Resultados del análisis de cadmio en el suelo	27
5. Descripción del contenido de cadmio en la raíz (mg/kg).....	27
6. Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk para contenido de cadmio en la raíz.....	28
7. Prueba de Krusk - Wallis – rangos.	28
8. Descripción del contenido de cadmio en la parte aérea (mg/kg).....	30
9. Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk para contenido de cadmio en la parte aérea.....	30
10. Análisis de Varianza de cadmio en la parte aérea	31
11. Prueba de Duncan para los tratamientos del contenido de cadmio en la parte aérea.	31
12. Descripción del contenido de bioconcentración de cadmio en la raíz	33
13. Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk para contenido de bioconcentración de cadmio en la raíz.....	33
14. Análisis de Varianza de bioconcentración de cadmio en la raíz.....	34
15. Prueba de Duncan para los tratamientos de bioconcentración de cadmio en la raíz.....	35
16. Descripción del contenido de bioconcentración de cadmio en la parte aérea.....	37
17. Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk para contenido de bioconcentración de cadmio en la parte aérea.....	37
18. Análisis de Varianza de bioconcentración de cadmio en la parte aérea...	38
19. Prueba de Duncan para los tratamientos de bioconcentración de cadmio en la parte aérea.....	38
20. Resultados del bioconcentración de cadmio en la raíz y en la parte aérea.....	40
21. Prueba de T para la igualdad de medias.....	40
22. Descripción del crecimiento de la planta.....	43

23.	Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk para crecimiento de la planta....	43
24.	Prueba de Krusk - Wallis – rangos.	44
25.	Descripción del crecimiento de la raíz.....	45
26.	Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk para crecimiento de la raíz....	46
27.	Prueba de Krusk - Wallis – rangos.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
1. Diagrama de caja de la Prueba de Kursk - Wallis para el contenido de cadmio en la raíz.....	29
2. Diagrama de medias para el contenido de cadmio en la parte aérea.....	32
3. Diagrama de media para la bioconcentración de cadmio en la raíz.....	36
4. Diagrama de media para la bioconcentración de cadmio en la parte aérea.....	39
5. Diagrama de barras para la bioconcentración de cadmio en la raíz y bioconcentración de cadmio en la parte aérea.....	42
6. Diagrama de cajas para el crecimiento de la planta.....	45
7. Diagrama de cajas del crecimiento de la raíz.....	48

RESUMEN

El proyecto “Fortalecimiento de las capacidades locales para la descontaminación y recuperación de la cuenca del río Mantaro, mediante la implementación y gestión ambiental para contribuir a un desarrollo sostenible de la región Junín” realizado por el arzobispado de Huancayo, determinó que los suelos del distrito El Mantaro, Jauja, contienen alto contenido de cadmio, y superan el Estándar de Calidad Ambiental (ECA). Con base en esta información, los objetivos de este estudio fueron determinar la cantidad de cadmio fitoestabilizado por *Lupinus mutabilis* en un suelo contaminado del distrito El Mantaro, con diferentes dosis de estiércol de lombriz, asimismo, se determinó el factor de bioconcentración en raíz y parte aérea, y la influencia en el crecimiento de lupino. El suelo del experimento tuvo 31,98 mg/kg de cadmio, mayor en casi 23 veces que el Límite Máximo Permisible (LMP) del ECA de suelos del Perú. Se aplicaron 5 tratamientos de estiércol de lombriz: 0, 3, 6, 9 y 12 %, dispuestos en un diseño experimental completamente aleatorizado. Se evaluó el contenido de cadmio en la raíz y parte aérea, materia seca de la parte aérea y raíz, altura de planta y se calculó el factor de bioconcentración. Se concluyó que la cantidad de cadmio fitoestabilizado en las raíces de lupino fue de 13,33 mg/kg con el tratamiento de 9 % de estiércol de lombriz; el factor de bioconcentración de cadmio más alto en la raíz fue de 0,492 mg/kg con la dosis de 9 % de estiércol de lombriz y en la parte aérea fue de solo 0,0154 mg/kg con la misma dosis de humus de lombriz; el tratamiento de 12 % de estiércol de lombriz favoreció la formación de materia seca y altura de planta. El crecimiento de *L. mutabilis* fue de 13,33 cm en promedio y en la raíz 12,50 cm, ambos valores se obtuvieron con el tratamiento 12 %.

Palabras clave: *Lupinus mutabilis*, cadmio, fitoestabilización, fitorremediación, contaminación

ABSTRACT

Project "Strengthening local capacities for the recovery and recovery of the Mantaro river basin, through environmental implementation and management to contribute to the sustainable development of the Junín región", carried out by the archbishopric of Huancayo, determined that the soils of the El Mantaro, Jauja, high cadmium content, and exceed the Environmental Quality Standard (ECA). Based on this information, the objectives of this study were determined by the amount of cadmium phytostabilized by *Lupinus mutabilis* in a contaminated soil of El Mantaro district, with different doses of earthworm manure, the bioconcentration factor was determined in root and aerial part, and the influence on lupine growth. The soil of the course had 31.98 mg / kg of cadmium, greater by almost 23 times than the Maximum Permissible Limit (LMP) of the soil ECA of Peru. Five earthworm manure treatments were applied: 0, 3, 6, 9 and 12%, arranged in a completely randomized experimental design. The content of cadmium in the root and aerial part, the dry matter of the aerial part and root, the height of the plant and the calculation of bioconcentration factor were evaluated. It was concluded that the amount of cadmium in the roots of lupine was 13.33 mg / kg with the treatment of 9% earthworm manure; the highest bioconcentration factor for cadmium in the root was 0.492mg/kg with the 9% dose of earthworm manure and in the aerial part it was only 0.0154 mg/kg with the same dose of earthworm humus; The 12% treatment of earthworm manure favored the formation of dry matter and plant height. The growth of *L. mutabilis* was 13.33 cm on average and at the root 12.50 cm, both values were obtained with the 12% treatment.

Key words: *Lupinus mutabilis*, cadmium, phytostabilization, phytoremediation, contamination

INTRODUCCIÓN

Los suelos del distrito El Mantaro tienen un uso predominantemente agrícola, los cultivos de maíz, papa, trigo y haba se utilizan en la alimentación de los pobladores y sus residuos se utilizan en la alimentación del ganado o se incorporan al suelo para su mejora; estos suelos han sido reportados como contaminados por metales pesados (1). En la zona alta y media de la cuenca del río Mantaro se reportó antimonio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc. Asimismo, en el Valle del Mantaro se han evidenciado concentraciones de cadmio en dos áreas de monitoreo, ubicados en los distritos de Orcotuna, Concepción y El Mantaro, (Jauja); las concentraciones de este metal superaron en 9,5 y 13,5 veces el Estándar de Calidad Ambiental de Canadá (ECA –C), ambas áreas son regadas por el río Mantaro.

Los suelos agrícolas del distrito El Mantaro están contaminados por cadmio, este metal pesado es transferido del suelo a las plantas y puede ser asimilado por la biota del suelo, ocasionando una disminución en la concentración del metal pesado, su transferencia a las plantas puede ocasionar problemas de toxicidad a los humanos o animales que lo consumen.

Al margen de sus fuentes, las personas están expuestas a estos elementos tóxicos cada día, a través de la ingestión de alimentos o el agua que proviene del suelo. Los metales tóxicos pueden llegar al suelo por deposición directa o indirecta, y forman parte de la cadena alimenticia: suelo – planta – animal – humano. Desafortunadamente, una vez que estos elementos forman parte de la cadena alimenticia, pueden acumularse en los tejidos corporales de humanos y animales alcanzando niveles tóxicos (2).

El incremento de la contaminación del suelo con metales pesados debido a las diferentes actividades humanas y naturales ha generado la necesidad de observar con mayor énfasis la contaminación ambiental. Se han desarrollado algunas tecnologías de remediación para tratar suelos contaminados, como es la fitorremediación, tecnología basada en la biología. La fitorremediación incluye la fitoestabilización, la fitovolatilización y la fitoextracción, utilizando especies hiperacumuladoras (3).

Entre las alternativas para disminuir el riesgo ambiental ante suelos contaminados por estos metales se encuentran el uso de plantas para estabilizar la superficie; la reducción de lixiviación de contaminantes a las capas profundas del suelo y la reducción de erosión. La fitoestabilización, considera el uso de especies vegetales tolerantes a

metales pesados para inmovilizarlos bajo tierra, disminuyendo la movilidad del metal y reduciendo la probabilidad de ingreso de la cadena alimenticia (4).

Por esta razón, se propone la evaluación del lupino (*L. mutabilis*) como planta fitoestabilizadora para evaluar su carácter fitorremediador de cadmio en suelos naturalmente contaminados, como una técnica económica y fácil de aplicar, porque es una especie que se desarrolla muy bien en los suelos del valle del Mantaro.

El presente informe de investigación consta de 4 capítulos, en el Capítulo I se presenta el planteamiento del estudio, con la pregunta de investigación: ¿Cuál es el potencial de *L. mutabilis* en la fitoestabilización de cadmio en los suelos de El Mantaro? Además, se plantean las hipótesis, objetivos y justificación del estudio.

En el Capítulo II se presenta el marco teórico, los antecedentes del problema, las bases teóricas de la fitorremediación, la fitoestabilización en el comportamiento del cadmio en el suelo y se incluye la definición de términos básicos.

El Capítulo III incluye la metodología, se especifica el método y alcance de la investigación, así como el diseño, población y técnicas de análisis de datos.

En el Capítulo IV se presentan los resultados y discusión, con las respectivas tablas de análisis de datos en *L. mutabilis*.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

Existen diferentes alternativas de remediación, una de ellas, es la fitorremediación para la contaminación del suelo, como un absorbente de contaminantes del suelo a través de las raíces, pudiendo trasladarlos a la parte aérea de la planta o estabilizándolos en su sistema radicular, lo que constituye la fitoestabilización.

La fitorremediación utiliza plantas y sus microorganismos rizosféricos asociados para remover, degradar, o inmovilizar diferentes contaminantes de suelos contaminados, sedimentos, aguas freáticas, o aguas superficiales. Las primeras investigaciones indican que la fitorremediación es una solución de limpieza prometedora para una amplia variedad de sitios contaminados, aunque tiene sus restricciones, entre ellas el tiempo de crecimiento y longitud de la planta. Las limitaciones y ventajas de la fitorremediación son un resultado directo del aspecto biológico de este tipo de sistema de tratamiento (4).

Una gran variedad de especies de plantas incluyendo cultivos hortícolas y pastos acumulan o inmovilizan metales pesados. Investigaciones recientes resaltan el uso de plantas como herramientas estabilizantes o extractivas para suelos contaminados con metales (5) (6). Durante la fitoestabilización, la movilidad de los contaminantes es reducida por la acumulación dentro de las plantas, adsorción sobre las raíces, o conversión a especies inmóviles dentro de la zona radicular, estas plantas son denominadas

“metalófitas”. El establecimiento de una cubierta vegetal en lugares contaminados puede retener contaminantes in situ, reduciendo así pérdidas por erosión y percolación a través del perfil de suelo. Cuando la revegetación de suelos contaminados se combina con el agregado de enmiendas como materia orgánica, la movilidad de los contaminantes en el suelo puede ser reducida a futuro (7).

Las plantas realizan un rol importante en la fitoestabilización, no solo por la protección de la superficie del suelo del contacto humano e impacto de la lluvia cuando logran una densa cubierta vegetal, sino también por estabilizar físicamente el suelo con un denso sistema radicular para prevenir la erosión. Las raíces de las plantas ayudan a minimizar la percolación del agua a través del suelo, además de reducir la lixiviación de contaminantes. En la selección de especies adecuadas para la fitoestabilización se debe tener en cuenta los siguientes criterios: (i) las plantas deben ser tolerantes a las condiciones del suelo, (ii) desarrollar rápidamente una gran cubierta vegetal, (iii) tener un denso sistema radicular, (iv) ser fáciles de establecer y mantenerse bajo condiciones de campo, (v) tener un largo periodo vegetativo y ser capaces de autopropagarse (8).

Existen dos principales componentes en el proceso de fitoestabilización: la planta en sí misma y las enmiendas agregadas al sistema. La fitoestabilización es similar al establecimiento de un prado, las enmiendas usadas en agricultura también pueden ser aplicadas y ayudarán a inactivar metales contaminantes, prevenir su absorción por la planta, y reducir la actividad biológica. Las enmiendas deberían ser fáciles de manipular y aplicar, ser segura para los trabajadores que la manipulan, no ser tóxicos para las plantas, fáciles de producir y baratas. Las enmiendas del suelo con poco o ningún valor económico, como conchas de ostras para corregir el pH o estiércoles son utilizadas para complementar la materia orgánica y son preferidos respecto a materiales caros (9) (10).

Diferentes especies de plantas son fitorremediadoras, existen especies que tienen como característica fitoestabilizar los elementos contaminantes a través de sus raíces, como es el género *Lupinus*. Algunas investigaciones, reportan al tarwui blanco (*Lupinus albus*), como una planta fitorremediadora, por esta razón se evaluará en qué medida el lupino de nuestra zona (*L. mutabilis*), puede fitoestabilizar el cadmio de los suelos del valle del Mantaro.

1.1.2 Formulación del problema

A) Problema general

ξ ¿Cuál es el potencial de *Lupinus mutabilis* en la fitoestabilización de cadmio en los suelos de El Mantaro?

B) Problemas específicos

ξ ¿En qué medida *Lupinus mutabilis* fitoestabiliza el cadmio en un suelo contaminado al que se ha aplicado diferentes dosis de estiércol de lombriz?

ξ ¿Cuál es el factor de bioconcentración de cadmio en la raíz y en la parte aérea de la planta *Lupinus mutabilis*?

ξ ¿En qué medida influye el suelo agrícola contaminado con cadmio al que se aplicó diferentes dosis de estiércol de lombriz, en el crecimiento de *Lupinus mutabilis*?

1.2 Objetivos

1.2.1 General

ξ Determinar el potencial de *Lupinus mutabilis* en la fitoestabilización de cadmio en los suelos de El Mantaro.

1.2.2 Específicos

ξ Determinar la cantidad de cadmio fitoestabilizado por *Lupinus mutabilis* en un suelo contaminado del El Mantaro, que ha recibido diferentes dosis de estiércol de lombriz.

ξ Determinar el factor de bioconcentración de cadmio en la raíz y en la parte aérea de *Lupinus mutabilis*.

ξ Determinar la influencia del suelo contaminado con cadmio, en el crecimiento de *Lupinus mutabilis*, con diferente dosis de estiércol de lombriz.

1.3 Justificación e importancia

1.3.1 Justificación de la investigación

L. mutabilis, conocida como el Tarwi es una especie andina que reducirá la contaminación de cadmio en suelos contaminados de El Mantaro. Normalmente esta

leguminosa se siembra como bordes en los campos de diferentes cultivos en la zona de estudio. El cadmio se translocará difícilmente a la parte aérea donde se encuentran las partes cosechables (vainas) de consumo humano y animal, quedándose acumulado en la parte radicular. Este proceso de fitorremediación denominado fitoestabilización reducirá progresivamente la concentración de cadmio en suelos contaminados, estabilizándolos a través de la precipitación, adsorción en la superficie radicular o incorporación a los tejidos radiculares de la planta.

1.3.2 Importancia de la investigación

La fitoestabilización se presenta como una alternativa de un tipo de fitorremediación para los suelos de El Mantaro, contaminados con diferentes metales pesados, la cual es de relativo bajo costo y fácil de utilizar. Las especies cultivadas en El Mantaro se beneficiarán por las diferentes cantidades de estiércol de lombriz que se agregará al suelo para mejorar sus propiedades físico-químicas y biológicas, además del efecto favorable de la fijación biológica de nitrógeno atmosférico realizado comúnmente por *L. mutabilis*.

1.4 Hipótesis

1.4.1 General

ξ *Lupinus mutabilis* fitoestabiliza el cadmio de un suelo contaminado lo absorbe y acumula en su sistema radicular.

1.4.2 Específicas

ξ La especie *Lupinus mutabilis*, desarrollada en un suelo contaminado con cadmio, fitoestabiliza este elemento, a través de su absorción por las raíces, favorecido por la presencia de estiércol de lombriz.

ξ El factor de bioconcentración de cadmio en la raíz es superior al factor de bioconcentración de cadmio en la parte aérea de *Lupinus mutabilis*.

ξ El suelo agrícola contaminado con cadmio, influye en el crecimiento de *Lupinus mutabilis*, con diferente dosis de estiércol de lombriz.

1.5 Variables, operacionalización

1.5.1 Variable dependiente:

Y1 = Cadmio fitoestabilizado por *L. mutabilis*

Indicadores:

1. Contenido de cadmio en raíces de *L. mutabilis*
2. Factor de bioconcentración de cadmio

Y2 = Crecimiento de *L. mutabilis*

Indicadores:

1. Materia seca de la parte aérea
2. Altura de planta
3. Longitud de raíz
4. Materia seca de raíz

1.5.2 Variable independiente

X= Cadmio total en suelo contaminado

Indicadores:

1. Análisis del contenido de cadmio total en suelo contaminado

El parámetro inorgánico de cadmio en un suelo contaminado agrícola según el Ministerio del Ambiente D.S.N° 011 – 2017 es de 1,4 mg/kg.

OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIÓN	INDICADORES
VARIABLE DEPENDIENTE CADMIO FITOESTABILIZADO POR <i>Lupinus mutabilis</i>	Inmovilización de un contaminante en el suelo a través de la absorción y acumulación por las raíces, adsorción sobre las raíces, o precipitación dentro de la zona radicular de las plantas EPA (2000)	Cantidad de cadmio Concentración de cadmio	Contenido de cadmio en raíces de <i>Lupinus mutabilis</i> . Factor de bioconcentración de cadmio
VARIABLE DEPENDIENTE CRECIMIENTO DE <i>Lupinus mutabilis</i>	Acumulación de biomasa que puede medirse mediante el área foliar, peso de tallo, longitud de raíz, total o altura de planta.	Crecimiento de la planta Longitud de raíz Materia seca	Materia seca de la parte aérea (g) Altura de planta (cm) Longitud de raíz (cm) Materia seca de raíz (g)
VARIABLE INDEPENDIENTE CADMIO EN UN SUELO CONTAMINADO	Metal pesado que es retenido en el suelo, ya sea disuelto en la solución del suelo o bien fijado por procesos de adsorción complicación y precipitación.	Cantidad de cadmio en suelo contaminado	Análisis del contenido de cadmio total en suelo contaminado

Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

En el trabajo de investigación titulado “*Contribution to heavy and As-Loaded lupin root mineralization to the availability of the pollutants in multi-contaminated soils*”, se reporta que se llevó a cabo un experimento de incubación con raíces de lupino blanco conteniendo Cu, Zn, Cd, y As y suelos con diferente pH y concentraciones de estos contaminantes del área afectada por un derrame minero en Aznalcóllar (cerca de Sevilla, España) para evaluar el efecto de la descomposición de las raíces altamente contaminadas al pH y niveles extractables de estos contaminantes en el suelo con $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, y por lo tanto la longevidad de la fitoestabilización con lupino blanco. También se investigaron las relaciones entre el pH del suelo y niveles extractables de contaminantes después de la descomposición parcial de las raíces en el suelo. El lupino blanco (*Lupinus albus* L.) es un cultivo anual que ha sido utilizado para la fitoestabilización de suelos acidificados de contaminación múltiple. Una vez que se termina el ciclo del cultivo, después de la cosecha de los tallos, puede tomar lugar una transferencia progresiva de contaminantes desde las raíces al suelo, conforme se descomponen las raíces. Las raíces conteniendo contaminantes fueron mineralizadas (56 días) en el suelo a una tasa similar a los abonos animales (15,8 a 19,4 % del carbono orgánico total). El estimado de entradas de contaminantes de las raíces en comparación con sus concentraciones extractables en el suelo fueron altas, especialmente en los suelos control, no contaminados y neutros contaminados. Sin embargo, las concentraciones extractables de los elementos tóxicos en

el suelo fueron principalmente gobernados por el pH del suelo. Por lo tanto, la corrección y mantenimiento del pH del suelo dentro del rango de 5 - 6 después del cultivo de lupino es esencial para la fitoestabilización a largo plazo de suelos acidificados de contaminación múltiple (11).

En el trabajo de investigación titulado: “*Phytostabilization of glod mine tailings, New Zealand. Part 1: Plant Establishment in Alkaline Saline Substrate*”, se utilizaron ensayos de campo con lisímetros para (i) probar la habilidad de crecimiento de diferentes especies de plantas en un relave con enmiendas, y (ii) proporcionar información básica sobre el contenido de nutrientes y elementos químicos de aguas en los relaves. Se ensayó cebada (*Hordeum vulgare*), lupino azul (*Lupinus angustifolium*), y centeno (*Secale cereale*), usando fertilizante superfosfato y lodos de depuradora como enmiendas. El centeno creció bien en relaves enmendados con fertilizantes, pero con pobre crecimiento en relaves no enmendados; el crecimiento de cebada fue similar en relaves enmendados y no enmendados: el lupino azul tuvo pobre crecimiento en todos los tratamientos. Los relaves tuvieron pH alcalino (7,0 a 8,5) y el agua interactuó rápidamente (< 1 mes) con los relaves para hacerse fuertemente salinos. La generación menor de ácidos fue neutralizada por calcita, con la liberación asociada de iones calcio y carbonato. Las aguas del lixiviado estuvieron sobresaturadas con respecto a calcita y dolomita. Las concentraciones de sodio disuelto fueron superiores a 1000 mg.L⁻¹, pero el elevado calcio y magnesio aseguró que la sodicidad fuera más baja que los niveles tóxicos para las plantas. El centeno es una planta potencialmente útil para la rápida fitoestabilización de relaves, con la necesidad solo de enmiendas fosfatadas (12).

En el trabajo de investigación titulado: “*Assessing the Potential for Cadmium Phytoremediation with Calamagrostis epigejos: A Pot Experiment*”, se condujo un experimento en macetas por tres periodos de vegetación en un suelo arenoso (pH 7,5) para estudiar la absorción y distribución de cadmio en los tejidos de la planta de *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth. El cadmio fue aplicado como CdCl₂ (un total de 1 L de solución de 0, 20, 100 y 200 mg Cd.L⁻¹). La concentración de cadmio en los tejidos de las plantas (raíces, rizomas, hojas) y hojarasca incrementó con el cadmio aplicado. La mayor parte del cadmio estuvo acumulada en las raíces (varió de 1,88 ± 0,42 a 40,96 ± 16,71 mg.kg⁻¹ de masa seca), seguido por los rizomas (0,52 ± 0,13 a 25,70 ± 6,35 mg.kg⁻¹ de masa seca) y las hojas (0,30 ± 0,06 a 9,20 ± 1,93 mg.kg⁻¹ de masa seca). El factor de bioacumulación (relación de concentración hoja/suelo) incrementó significativamente de 0,70 ± 0,10 (control) a 1,13 ± 0,17 (100 mg Cd.l⁻¹), pero disminuyó con los niveles más altos de cadmio (200 mg Cd.l⁻¹) hacia 0,74 ± 0,34, que no fue significativamente diferente del

control. La relación de concentración de cadmio hoja/raíz (factor de translocación) no mostró relación significativa para incrementar la contaminación del suelo. Solo del 4 al 7 % del cadmio total en la planta fue acumulado en los tejidos de la parte aérea. El potencial de fitoextracción (cadmio total removido del suelo) dentro de las tres estaciones de crecimiento varió de 0,11 a 0,25 % del cadmio total del suelo. Esto está dentro del rango donde una aplicación para fitoextracción de cadmio ha sido sugerida por otros autores. Sin embargo, los autores concluyeron que el uso práctico de *Calamagrostis epigejos* para fitorremediación no está principalmente en el campo de la fitoextracción, sino en la fitoestabilización. *C. epigejos* tuvo la capacidad de estabilizar estructuralmente el suelo y reducir la contaminación de cadmio debido a la erosión. La absorción del pool de cadmio disponible y la acumulación en el sistema radicular puede prevenir posteriormente la lixiviación en el agua de riego (13).

En el trabajo de investigación titulado: "*Phytostabilization of amended soils polluted with trace elements using the Mediterranean shrub: Rosmarinus officinalis*" se evaluaron los efectos de dos enmiendas y el establecimiento de *Rosmarinum officinalis* sobre las propiedades químicas y bioquímicas en un suelo contaminado con elementos traza por un derrame minero y el posible uso de esta planta para propósitos de estabilización. El experimento se realizó usando recipientes llenados con suelo contaminado con elementos traza, donde se establecieron cuatro tratamientos: tratamiento orgánico (compost), tratamiento inorgánico (cal), control con planta y control sin planta). La aplicación de enmiendas y el establecimiento de las plantas contribuyó a restaurar las propiedades químicas (pH, carbono orgánico total y carbono soluble en agua) y bioquímicas del suelo (carbono en la biomasa microbial y las actividades enzimáticas: aril sulfatasa y proteasa). La presencia de romero no afectó el cadmio y zinc soluble (0,01 M CaCl₂) y disminuyó la extractabilidad de elementos traza con EDTA en suelos enmendados. No se encontró efectos negativos sobre el crecimiento de las plantas y contenido de nutrientes en suelos contaminados (tratamientos: control con planta, compost y cal). El contenido de elementos traza estuvo dentro de los niveles normales en las plantas. Por lo tanto, el romero podría ser una opción confiable para una fitoestabilización exitosa de suelos moderadamente contaminados con elementos traza (14).

En el trabajo de investigación titulado: "*Conventional crops and organic amendments for Pb, Cd and Zn treatment at a severely contaminated site*", se tuvo como propósito evaluar el crecimiento de especies de plantas sobre residuos metalíferos a escala de campo e invernadero y estudiar la influencia de materiales orgánicos como enmiendas del suelo sobre el crecimiento de la planta y transformación de los metales en el suelo. Los

objetivos fueron: (i) identificar cubiertas de cultivo adecuados para la revegetación de dos residuos metalíferos; (ii) determinar la magnitud de la absorción de Pb, Cd y Zn usando especies de plantas en un estudio de invernadero, (iii) evaluar la habilidad de enmiendas orgánicas seleccionadas en influenciar el crecimiento de las plantas y absorción de metales, (iv) conducir ensayos de campo para determinar la absorción o estabilización de metales por las plantas, y (v) determinar los cambios en fracciones químicas de metales del suelo como una función de cada tratamiento. Se cultivó espinaca (*Spinacea oleracea*), col (*Brassica oleracea*) y una mezcla gramínea-leguminosa (*Festuca roja*, *Festuca rubra*; *ryegrass*, *Lolium perenne*); y haba (*Vicia faba*) en invernadero sobre una base de escoria de hornos o mantillo de polvo enmendados con turba compostada. Todas las especies acumularon Pb, Cd y Zn en diferentes grados. Las concentraciones de metales totales en el suelo tuvieron una marcada influencia sobre la absorción de la planta. La incorporación de turba compostada vs. la aplicación superficial tuvo un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre las concentraciones de metales en tejidos de espinaca y col. El Pb y Zn del suelo tienden a cambiar hacia formas menos disponibles después de los tratamientos con turba compostada. Las parcelas de campo fueron tratadas con turba compostada, estiércol de granja y fertilizantes inorgánicos. La producción de materia seca de espinaca, col y la mezcla gramínea-leguminosa fue mayor con los tratamientos de turba compostada y estiércol de granja. La fitoestabilización en combinación con enmiendas orgánicas puede ser la tecnología más apropiada para asegurar la estabilización de metales del suelo en este lugar (15).

En el trabajo de investigación titulado: "Uso de *Cenchrus ciliaris* L. y *Setaria verticilata* L. en la fitoestabilización de suelos contaminados con plomo y cadmio", se tuvo como objetivo identificar especies de pastos tolerantes y no acumuladoras de metales pesados para ser utilizadas como especies fitoestabilizadoras de suelos contaminados con plomo y cadmio. En Bermejillo, Durango, México, se localiza una planta metalúrgica de la industria minera, representando una de las fuentes emisoras de compuestos de plomo más grandes de este país, provocando contaminación al ambiente y riesgos a la salud. En junio del 2009 se estableció un experimento de diseño factorial 2x3x2 en bloques al azar con cuatro repeticiones en condiciones de invernadero. Los factores variables fueron: especie (*Cenchrus ciliaris* L., y *Setaria verticilata* L.), dosis de plomo (0, 100 y 200 mg/kg) y dosis de cadmio (0 y 100 mg/kg). A los 40 días después de la siembra se cosechó, se separó parte aérea y raíz y se prepararon muestras de digestión húmeda para la determinación de plomo y cadmio mediante espectrofotómetro de absorción atómica con horno de grafito. Se encontró que *Setaria Verticilata* L. acumuló significativamente mayor cantidad de plomo y

cadmio en la raíz, y mayor concentración de cadmio en tejidos aéreos que *Cenchrus ciliaris* L. La acumulación de plomo y cadmio en ambas especies es reducida con respecto a la concentración de los metales presentes en el sustrato (16).

En el trabajo de investigación titulado: “Capacidad fitorremediadora de cinco especies alto andinas de suelos contaminados con metales pesados”, se evaluó la capacidad de fitorremediación de cinco plantas andinas: *Solanum nitidum*, *Brassica rapa*, *Fuertesimalva echinata*, *Urtica urens* y *Lupinus ballianus*, en suelos contaminados con plomo, zinc y cadmio. El trabajo fue realizado en condiciones de invernadero en el distrito de Lachaqui, provincia de Canta, región Lima, desde octubre de 2011 hasta octubre de 2012. Se evaluaron 20 tratamientos con un diseño factorial completo 5 x 4, con: 5 especies alto andinas, y 4 sustratos con 30 %, 60 %, 100 % de relave de mina y suelos sin relave de mina. La producción de biomasa disminuyó significativamente en *Solanum nitidum*, *Brassica rapa*, *Fuertesimalva echinata*, *Urtica urens* y *Lupinus ballianus*, con el tratamiento de 100 % de relave de mina. La mayor eficiencia de acumulación de plomo y zinc fue obtenida en las raíces de *Fuertesimalva echinata* con el tratamiento de 100 % de relave de mina, obteniendo 2015,1 mg de plomo/kg de materia seca y 1024,2 mg de zinc/kg materia seca. En las raíces de *L. ballianus* fue obtenida la más alta acumulación de cadmio, con una concentración de 287,3 mg/kg materia seca con el tratamiento de 100 % de relave de mina (17).

En el trabajo de investigación titulado. “*Phytostabilization of cadmium contaminated soils by Lupinus uncinatus Schldl*”. Se tuvo como objetivo explorar la acumulación, comportamiento y tolerancia de *Lupinus uncinatus* Schldl. con el incremento de concentraciones de cadmio en el suelo. Para este propósito se investigó los efectos de diferentes tratamientos de cadmio sobre el crecimiento de la planta, supervivencia, tolerancia al metal, acumulación de cadmio y distribución en diferentes órganos de la planta. Se instaló un experimento en macetas bajo condiciones de invernadero por 18 semanas. El cadmio fue agregado como $CdCl_2 \cdot 2(1/2)H_2O$ a las dosis de 0, 3, 6 y 9 mg Cd/kg suelo en tres diferentes momentos (después de la 4ta, 12 y 15 semana de crecimiento de la planta) con cuatro repeticiones. Los tratamientos de cadmio aplicados, fueron, entonces 9, 18 y 27 mg/kg. El Cd inhibió la altura de planta, el número de hojas e indujo un cambio significativo en el rendimiento de materia seca de raíces, tallos y hojas. El índice de tolerancia fue de 88, 82 y 49 % para los tratamientos de 9, 18 y 27 mg Cd/kg respectivamente. La máxima concentración de Cd en los tallos (hojas + tallo) de 540 mg Cd/kg de materia seca fue hallado en el tratamiento con 27 mg Cd/kg suelo. Fue evidente la pobre translocación de Cd de las raíces a los tallos con una relación tallo: raíz < 1. El

presente trabajo es el primer reporte acerca del crecimiento de *L. uncinatus* con exceso de Cd, su grado de tolerancia y patrón de acumulación de Cd en respuesta a los tratamientos variados de Cd en el suelo, sugiere el uso de *L. uncinatus* para fitoestabilización y revegetación de suelos contaminados con Cd (18).

En el trabajo de investigación titulado: “*Use of White lupin plant for phytostabilization of Cd and As polluted acid soil*”, se tuvo como objetivo estudiar si es posible el uso de lupino blanco en la fitorremediación de suelos afectados por lodos de pirita ácida, con contaminación simultánea de cadmio y arsénico. Se realizaron experimentos de campo y macetas con suelos afectados con lodos. El ensayo de macetas mostró que el tratamiento con ácido nitrilotriacético incrementó las concentraciones de cadmio y arsénico en los lixiviados, excediendo los niveles máximos permisibles, de tal manera que se evitó su uso en experimentos de campo. En el experimento de campo, la fitoextracción de cadmio y arsénico por las plantas de lupino fue muy baja, sugiriendo que no es recomendada para fitoextracción. Sin embargo, el cultivo de lupino en el campo produce varios beneficios: incrementa el pH ácido del suelo probablemente por la excreción de citrato, disminuye las fracciones solubles de cadmio y arsénico, tiene alta concentración de arsénico y cadmio en las raíces con acumulación de metales pesados en los nódulos de las raíces. Todos estos resultados sustentan el uso de *Lupinus albus* para la fitoestabilización y revegetación de suelos contaminados por derrames (19).

2.2. Base teórica

2.2.1 La fitorremediación

La fitorremediación es el nombre dado a un grupo de tecnologías que usa plantas para limpiar sitios contaminados. El término fitorremediación se refiere a un grupo de interacciones planta - contaminante, y no a cualquier aplicación específica. La mayoría de las técnicas de fitorremediación involucran la aplicación de información que ha sido conocida por años en agricultura, silvicultura, y horticultura a los problemas ambientales. El término fitorremediación (*Phyto* = planta y *remediación* = corregido el mal) es relativamente nuevo, ideado en 1991. La información básica por lo cual es ahora llamado fitorremediación proviene de una variedad de áreas de investigación incluyendo acumulación de metales pesados en humedales construidos, derrames de petróleo y acumulación de plantas. Los esfuerzos de investigación en la remediación pueden ser categorizados en dos grupos: exploración de mecanismos y evaluación de recuperaciones. Los mecanismos de trabajo se han centrado en hallazgos de límites teóricos, y

explicaciones para los resultados observados en el campo. El trabajo de campo a escala piloto tuvo precedentes seguida de investigación explicativa de laboratorio y los primeros éxitos han sido de particular interés. A largo plazo, el objetivo de las evaluaciones de campo es crítico para entender que tan bien puede trabajar la fitorremediación, cual es el real costo de su aplicación, y como se puede construir modelos para predecir la interacción entre plantas y contaminantes (20).

Las plantas verdes pueden también participar en la fitorremediación, cuyo proceso es denominado fitorremediación. Por varias décadas, los sistemas basados en plantas han sido usados para remover contaminantes de residuos municipales de agua. Recientemente, este concepto se ha extendido para contaminantes industriales del suelo y para la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos de aguas subterráneas superficiales. La forma más simple y básica de la fitorremediación es la *fitoestabilización*, en el cual casi cualquier clase de cubierta vegetal se cultiva para estabilizar el contaminante y reducir su movimiento en el ambiente. En la fitoestabilización las plantas proporcionan varios servicios: (i) proporciona una cubierta vegetal para reducir el movimiento de suelos contaminados y polvos por erosión del agua y del viento; (ii) su transpiración reduce la cantidad de agua de lluvia que se mueve a través del suelo contaminado y así reduce la producción de lixiviados contaminados; (iii) pueden absorber el contaminante y secuestrarlo en su sistema radicular; y (iv) las raíces de las plantas pueden causar la precipitación del contaminante en la rizosfera. La principal desventaja del enfoque de fitoestabilización es que el contaminante no es removido o destruido, porque permanece en el suelo (21).

La fitorremediación aprovecha el hecho de que algunas especies vegetales están adaptadas a vivir en suelos ricos en metales pesados o que pueden ser tolerantes a estas condiciones. Esta técnica de mejora de suelos contaminados resulta más barata que las de ingeniería civil o de ingeniería química; puede tener una mejor adaptación social; mejora el paisaje y sirve para controlar la erosión. Como inconvenientes cabe indicar que habrá que prever como deshacerse de la biomasa producida enriquecida en metales, que habrá que recoger y llevar a vertedero o incinerar (22).

A un nivel más sofisticado, se han hallado o se han desarrollado ciertas plantas que pueden remover con bastante eficacia, acumular, o degradar contaminantes específicos del suelo. Esta fitorremediación usa las plantas en dos maneras fundamentalmente diferentes. En la primera, las raíces de las plantas absorben el contaminante del suelo. La acumulación de concentraciones inusualmente altas de un contaminante en la biomasa

aérea de la planta es denominada hiperacumulación. Las plantas hiperacumuladoras absorben y toleran altas concentraciones de un contaminante particular, más comúnmente un metal tóxico como cadmio o níquel, pero también ciertos compuestos orgánicos como TNT (trinitrotolueno) La hiperacumulación permite que el contaminante sea removido mediante la cosecha de los tejidos de plantas. El material vegetal cosechado puede tener concentrado el contaminante que debe ser tratado como material peligroso. Afortunadamente, para ciertos contaminantes orgánicos, las plantas pueden metabolizar el contaminante acumulado en subproductos menos peligrosos. Un segundo tipo de limpieza usando plantas es denominado fitodegradación ayudada por la rizosfera. En este proceso, las plantas no absorben el contaminante, es decir las raíces de las plantas excretan al suelo compuesto de carbono que sirven como substratos microbiales y reguladores de crecimiento. Estos compuestos estimulan el crecimiento de las bacterias de la rizosfera, y degradan los contaminantes orgánicos. La transpiración de agua por la planta causa que el agua del suelo, con su concentración de moléculas contaminantes disueltas, pueda moverse hacia las raíces, incrementando así la eficiencia de las reacciones de la rizosfera. El proceso puede ser mejorado más aún por el trabajo en equipo de las plantas con hongos micorrizales simbióticos apropiados (2).

2.2.2 Fitoestabilización

Se define como (i) inmovilización de un contaminante en el suelo a través de la absorción y acumulación por las raíces, adsorción sobre las raíces, o precipitación dentro de la zona radicular de las plantas, y (ii) el uso de plantas y raíces para prevenir la contaminación de contaminantes vía erosión de agua y aire, lixiviación y dispersión del suelo (20).

La fitoestabilización se presenta a través de la microbiología y química de la zona radicular, y la alteración del ambiente suelo o química del contaminante. El pH del suelo puede cambiar por los exudados de la raíz o a través de la producción de CO₂. La fitoestabilización puede cambiar la solubilidad o movilidad de los metales o impactar la disociación de compuestos orgánicos. El ambiente suelo afectado por las plantas puede convertir los metales de un estado de oxidación soluble a una forma insoluble (Salt et al., 1995). La fitoestabilización también puede presentarse a través de la sorción, precipitación, complejación, o reducción de valencia de metal (23).

El término fitolignificación ha sido también usado para referirse a una forma de fitoestabilización en el cual los compuestos orgánicos son incorporados en la lignina de las

plantas (24). Los compuestos pueden también pueden ser incorporados en materiales húmicos en los suelos en un proceso probablemente relacionado a la fitoestabilización en su uso de materiales planta.

Las ventajas de la fitoestabilización son: (i) la remoción del suelo es innecesaria, (ii) tiene un bajo costo y es menos destructivo que otras tecnologías de remediación del suelo más vigorosos, (iii) la revegetación favorece la restauración del ecosistema, y (iv) la disposición de materiales peligrosos o biomasa no es necesaria. Las desventajas de la fitoestabilización son: (i) el contaminante permanece en el lugar. La vegetación y el suelo pueden necesitar mantenimiento de largo plazo para prevenir la liberación de los contaminantes y futura lixiviación, (ii) la vegetación puede necesitar una extensa fertilización o modificación del suelo usando enmiendas, (iii) debe evitarse la absorción de metales por la planta y translocación a la porción aérea, (iv) la zona radicular, exudados radiculares, contaminantes, y las enmiendas del suelo deben ser monitoreados para prevenir un incremento en la solubilidad y lixiviación de metales, (v) la fitoestabilización debe ser considerada solo una medida provisional, y (vi) la estabilización de contaminantes podría ser debido primariamente a los efectos de las enmiendas del suelo, con las plantas solo contribuyendo a la estabilización por disminución de la cantidad de agua que se mueve a través del suelo y por estabilización física del suelo contra la erosión (20).

2.2.3 El cadmio en el suelo

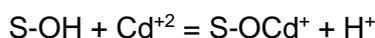
2.2.3.1 Reacciones del cadmio en los suelos

El cadmio en los suelos está casi invariablemente presente en el estado de oxidación Cd(II). No es un metal de transición. Participa en enlaces covalentes con superficies adsorbentes y, es por lo tanto, menos soluble que cationes como el Ca^{+2} (25).

Las concentraciones de Cd en soluciones suelo no contaminadas (Cd total $\sim 0,2$ mg Cd/kg) en el rango de pH neutro es $< 0,1 - 5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (26). Esto significa que solo una pequeña fracción del Cd total está presente en la solución suelo y la pérdida anual de Cd por lixiviación son generalmente imperceptibles. El mecanismo de enlace preciso de Cd en el suelo es casi imposible detectar con técnicas espectroscópicas comunes en concentraciones ambientalmente relevantes. Por lo tanto, los datos de solubilidad o extracción química son usados para inferir indirectamente el mecanismo de enlace de cadmio. Se sugirió que la adsorción y no la precipitación controlan el Cd en solución en concentraciones ambientalmente relevantes en el suelo ($0,1 - 10$ mg/kg); el Cd en solución

incrementa casi proporcionalmente a la adición de Cd, mientras que las reacciones de precipitación podrían inferir las constantes de concentración en solución con el incremento de adiciones de Cd (27). La precipitación es improbable que controle la solubilidad del Cd a menos que sea excesiva la contaminación de Cd y el pH sea mayor de 7,0. Por ejemplo el producto de solubilidad del CdCO_3 ($K_{ps} = 10^{-12}$), la forma de Cd posiblemente más insoluble en suelos aeróbicos, predice que el Cd precipita en suelos calcáreos a pH 8,5 solo sobre $55 \mu\text{g Cd}^{+2} \cdot \text{L}^{-1}$. Las reacciones de adsorción y complejación en solución en un suelo reducen típicamente el Cd^{+2} a ese pH a $< 10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ para los suelos que tengan 10 mg Cd/kg. Esto significa que las concentraciones de Cd en el suelo deberían exceder $> 100 \text{ mg Cd/kg}$ para que esta reacción de precipitación pueda presentarse, valores muy superiores al rango de concentraciones de Cd en el suelo (25).

La materia orgánica del suelo, los oxihidróxidos de Fe, Al y Mn y los minerales de arcilla son los tres principales adsorbentes de Cd en el suelo. Los protones son los principales cationes que compiten por la adsorción de Cd en la materia orgánica u oxihidróxidos debido al enlace del Cd^{+2} a átomos de oxígeno superficiales de grupos carboxílicos o fenólicos de sustancias húmicas o a grupos hidroxil superficiales en oxihidróxidos. Una ecuación de adsorción general podría ser:



En donde S-OH es el grupo hidroxil superficial. Esta ecuación simplificada predice que el incremento de H^{+} disminuye drásticamente la adsorción. Las constantes de adsorción de Cd^{+2} para ácidos húmicos (la fase adsortiva principal de la materia orgánica del suelo) y de los hidróxidos de Fe ilustran que los órdenes de magnitud del Cd^{+2} son más selectivos que el Ca^{+2} . La selectividad $\text{Cd}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$ para la adsorción en minerales de arcilla es típicamente menos de 5 en condiciones normales (Farrah et al, 1980), por lo tanto, es poco probable que los minerales de arcilla sean importantes adsorbentes para el Cd en la mayoría de los suelos. Los modelos de especiación predicen que la mayor parte del Cd está enlazado a la materia orgánica en los suelos con $\text{pH} < 6,5$ mientras que los óxidos de Fe son los más importantes constituyentes adsorbentes a $\text{pH} > 6,5$ (28).

2.2.3.2 Transferencia del cadmio en el sistema suelo – planta

El cadmio no tiene un rol fisiológico conocido en las plantas superiores, pero es fácilmente absorbido del suelo y es translocado a los tejidos aéreos de la planta (29). Se reportan tres principales caracteres de absorción de Cd:

- **Biodisponibilidad relativamente alta.** Las concentraciones de Cd en el cultivo son mayores que las concentraciones de Cd en el suelo.
- **Absorción no regulada.** La absorción de Cd no está regulada por límites fisiológicos (demanda de la planta) y la absorción de Cd no incrementa con el incremento de concentraciones de Cd en el suelo. Estudios experimentales mostraron que el Cd es administrado como sales de Cd^{+2} y que la absorción incrementó linealmente con el Cd en el suelo con tal que las otras propiedades del suelo permanecieran constantes (30).
- **La biodisponibilidad de Cd varía bastante y las concentraciones de Cd total en el suelo predicen pobremente la absorción de Cd.** En condiciones de idéntico Cd total en el suelo, el Cd en el cultivo varía en más de 10 veces. El Cd total en el suelo explica menos del 50 % de la varianza de las concentraciones de Cd en el cultivo (31). Esto significa que las concentraciones totales de Cd en el suelo son pobres predictores del riesgo de Cd.

2.3 Definición de términos básicos

Fitorremediación: es una tecnología que utiliza diferentes especies de plantas para degradar, extraer, almacenar, o inmovilizar contaminantes del suelo y del agua, esta tecnología ha recibido bastante atención últimamente como una alternativa innovadora y económica respecto a los métodos de tratamiento ya establecidos usados en lugares de residuos peligrosos (20).

Absorción: es un proceso físico-químico mediante el cual una o más especies químicas en la fase líquida o gaseosa penetran en la fase absorbente atravesando su superficie y se difunden dentro de su estructura. Puede ser inorgánico u orgánico (38).

Adsorción: es un proceso físico-químico por el cual se produce una acumulación o un aumento de concentración de sustancia o material en la interfase entre la fase sólida y la fase líquida circundante. Según el tipo de unión puede tener carácter reversible o irreversible (32)

Biodisponibilidad: el término biodisponibilidad establece la medida de la tasa y extensión de la absorción de una sustancia activa que alcanza el sistema circulatorio de un organismo, en resumen, la extensión de su absorción y circulación sistémica por el organismo (33).

Coefficiente de bioacumulación: se define como la relación de la concentración de metal en la planta (g de metal/g de peso seco) a la concentración inicial del metal en solución (mg metal/L), para rizofiltración de metales (34).

Contaminación: puede ser definida como un cambio indeseable en las características físicas, químicas y biológicas del aire, agua y suelo que afecta la vida humana, la vida de los otros organismos relacionados, útiles para la vida de plantas y animales, el progreso industrial, condiciones de vida y aspectos culturales (35).

Factor de bioconcentración: la concentración en partes aéreas de la planta (sobre una base de peso seco) dividida por la concentración en el suelo de compuestos contaminantes (36).

Contaminante: un contaminante es algo que interfiere adversamente a la salud, el confort, amenidades, características o ambiente de las personas. Generalmente, muchos contaminantes son introducidos al ambiente como aguas residuales, residuos, descargas accidentales o son subproductos o residuos de la producción de algo útil. También son introducidos al ambiente como compuestos usados para proteger plantas y animales (35).

Fitoestabilización: consiste en la inmovilización de un contaminante a través de la absorción y acumulación por las raíces, adsorción sobre las raíces, o precipitación dentro de la zona radicular de las plantas (20).

Metales pesados: los metales pesados son elementos que tienen una densidad mayor de 5 en su forma elemental y comprenden 38 elementos. Sin embargo, el término usualmente se refiere a 12 metales que son usados y generados por la industria, estos son, **Cd**, Cr, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn y Zn. Los metales pesados mayormente se hallan en sitios de adsorción específica en el suelo donde ellos son retenidos muy fuertemente en los coloides orgánicos o inorgánicos (35).

Fitoextracción: la absorción de contaminantes por las raíces de las plantas y la translocación hacia la parte aérea, donde generalmente es removida por la cosecha. Esta tecnología es frecuentemente aplicada a suelos o aguas contaminadas por metales (20).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Método y alcance de la investigación

3.1.1 Método general

El método de investigación es **hipotético - deductivo**, donde la aseveración de la hipótesis planteada sobre la estabilización del cadmio en lupino se busca refutarla o falsearla, deduciendo las conclusiones que se confrontan con los datos obtenidos.

3.1.2 Método específico

Se utilizó el método de análisis: muestreo de la parte aérea de la planta, y de la raíz de *L. mutabilis* para determinar el contenido de cadmio total, utilizando metodologías de análisis establecidas en la legislación ambiental vigente en el país, establecidas en el Estándar de Calidad Ambiental de Suelos (ECA - Suelos) del Perú, mediante el D.S. 011 – 2017 - Minam.

3.1.3 Alcance de la investigación

El tipo de investigación es **aplicada**, pues es de naturaleza eminentemente práctica para aplicar las bases teóricas de la fitorremediación del cadmio utilizando *L. mutabilis* en un suelo contaminado del distrito El Mantaro, al cual se le ha aplicado estiércol de lombriz

en diferentes dosis; de esta manera se espera reducir la contaminación de cadmio en el suelo.

3.2 Diseño de la investigación

3.2.1 Diseño experimental

Los tratamientos fueron dispuestos en un Diseño Completamente al Azar (DCA) con 5 tratamientos, donde se incluye un grupo control o testigo, cada uno con 3 repeticiones, en total se tuvieron 15 unidades experimentales.

El presente trabajo de investigación consta de un diseño con un grupo experimental y un grupo control, incluye la asignación aleatoria de las unidades de análisis. El esquema del diseño es:

Grupo experimental (R) X 01

Grupo control (R) - 02

Donde:

R = Asignación aleatoria de los tratamientos

X = Variable independiente (cadmio total en suelo contaminado)

O1= Medición de la variable dependiente (cadmio fitoestabilizado por *L. mutabilis*) en el grupo experimental

O2 = Medición de la variación objeto de estudio (Crecimiento de *L. mutabilis*) en el grupo control (testigo)

Modelo aditivo lineal del diseño experimental:

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

Donde:

γ_{ik} = Cualquier observación del experimento

μ = Media poblacional

τ_i = Efecto del i-ésimo tratamiento

ε_{ij} = Error experimental

3.2.2 Caracterización del suelo contaminado

Se localizó un área del distrito El Mantaro, provincia Jauja, con suelos contaminados con cadmio, con base en los datos georreferenciados del Proyecto Mantaro Revive (2007), se muestreó al azar, tomando 15 muestras simples de la primera capa u horizonte (A), aproximadamente se obtuvo 25 kg de suelo en total, lo cual fue debidamente mezclado y homogenizado para obtener 1 kg de muestra compuesta para el posterior análisis en el laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.

Tabla 1

Tratamientos del estudio

N°	TRATAMIENTOS
1	Suelo contaminado Cd + 0 % estiércol de lombriz + <i>L. mutabilis</i>
2	Suelo contaminado Cd + 3 % estiércol de lombriz + <i>L. mutabilis</i>
3	Suelo contaminado Cd + 6 % estiércol de lombriz + <i>L. mutabilis</i>
4	Suelo contaminado Cd + 9 % estiércol de lombriz + <i>L. mutabilis</i>
5	Suelo contaminado Cd + 12 % estiércol de lombriz + <i>L. mutabilis</i>

Fuente: elaboración propia

3.2.3 Conducción experimental

Preparación del suelo y siembra

- Se tamizó previamente la muestra de suelo obtenida en campo, utilizando un tamiz de 2 mm de diámetro promedio de malla (ASTM = N° 10).
- Se pesó 2 kg de suelo y se colocó en macetas.
- Se determinó la capacidad de campo de cada uno de los suelos, obteniéndose un valor de 25 %.
- Se le agregó 500 ml de agua al suelo para lograr el 25 % de humedad a capacidad de campo.
- Se dejó infiltrar el agua y se procedió a cerrar las bolsas hasta el día siguiente.

- Al día siguiente, se procedió a sembrar las semillas de lupino en sus respectivas bolsas, dejando 5 semillas por bolsa, según los tratamientos en estudio.
- Se mantuvo el 80 % de la humedad del suelo a capacidad de campo, en cada maceta, lo cual se ejecutó manteniendo 20 % de humedad.
- A los 15 días después de la siembra se homogenizó el número de plantas por tratamiento, dejándose solo 3 plantas por cada unidad experimental.

Conducción del experimento

- Se estableció el experimento por un periodo de 60 días, desde el 29 de mayo hasta el 27 de julio de 2017, realizándose una cuidadosa observación del crecimiento de las plantas, con riegos oportunos mediante el método de pesadas.
- Finalizado el periodo experimental se procedió a cortar la parte aérea de cada tratamiento y colocarlo en una bolsa de papel Kraft y colocarlo en una estufa a 60°C para obtener el peso seco de planta.
- Luego se procedió a sacar la raíz de las plantas, de cada unidad experimental para medir su longitud y posteriormente secar en una estufa a 60 °C y obtener el peso seco de cada unidad experimental.
- Las raíces y la parte aérea de cada unidad experimental fueron enviadas al laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, para el análisis de Cadmio.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población estuvo constituida por los suelos agrícolas contaminados por cadmio del distrito El Mantaro.

3.3.2 Muestra

La muestra estuvo constituida por 15 unidades muestrales las cuales aproximadamente corresponden a un área de 450 m² ubicadas con base en coordenadas UTM y el uso agrícola. (Anexo N°1)

3.4 Técnicas de recolección de datos

3.4.1 Instalación del experimento

Identificado el suelo del distrito El Mantaro, contaminado por cadmio, se realizó la caracterización fisicoquímica de la capa superficial, con base en metodologías estándar del laboratorio de análisis de suelos, agua, plantas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, con una muestra aproximada de 1 kg de suelo. Asimismo, se determinó el contenido de cadmio total (mg/kg) en el suelo.

El método de análisis de cadmio en el suelo agrícola es EPA 3050 Y EPA3051 (Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos), según del D.S.011 – 2017 - MINAM.

Tabla 2

Análisis físico-químico del suelo del experimento

Parámetro	Método	Unidad de expresión
Textura	Hidrómetro	Clase textural
Salinidad	Conductómetro	dS.m ⁻¹ .
Calcáreo	Gasovolumétrico	%
pH	Potenciómetro	Unidad pH
Materia Orgánica	Walkley - Black	%
Capacidad de Intercambio Catiónico	Acetato de amonio 1N (reactivo)	meq/100 g
Cationes cambiabiles (Ca, Mg, K, Na, H, Al)	Absorción atómica en el extracto amónico	meq/100 g
P disponible	Olsen modificado	ppm
K disponible	Espectrofotómetro	ppm

Fuente: Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú

3.4.2 Finalización del experimento

Planta:

- Contenido total de cadmio (mg/kg) en la parte radicular
- Contenido total de cadmio (mg/kg) en la parte aérea
- Factor de bioconcentración (2):

$$\text{Factor de bioconcentración (FBC)} = \frac{\text{mg}_{\frac{\text{Cd}}{\text{kg}}}, \text{en planta}}{\text{mg}_{\frac{\text{Cd}}{\text{kg}}}, \text{en suelo}}$$

- Materia seca de la parte aérea (g)
- Altura de planta (cm)
- Materia seca de la parte radicular (g)
- Longitud de raíz (cm)

3.7 Técnicas de análisis de datos

Al finalizar el experimento se sistematizaron los resultados obtenidos y se analizaron los datos a través del Análisis descriptivo estadístico, la prueba de normalidad de Shapiro –Wilk, ANOVA, la prueba de comparación múltiples de Duncan y la prueba no paramétrica de Krusk – Wallis.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del tratamiento y análisis de información

4.1.1 Análisis suelo del experimento

Tabla 3

Descripción del análisis de caracterización del suelo agrícola

Parámetro	Resultado
Textura	
- Arena	33 %
- Limo	34 %
- Arcilla	33 %
Clase textural	Franco arcilloso
Carbonato de calcio total	0,00 %
Conductividad eléctrica	0,53 dS/m
pH	6,19
Fósforo disponible	33,9 ppm
Materia orgánica	2,65 %

Potasio disponible	107 ppm
Cationes cambiabiles	
- Calcio	10,80 meq/100 g
- Magnesio	2,28 meq/100 g
- Sodio	0,25 meq/100 g
- Potasio	2,40 meq/100 g
Capacidad de Intercambio catiónico efectiva	15,74 meq/100 g

Fuente: Laboratorio de Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima

De los resultados se observa que es un suelo de textura moderadamente fina (textura = franco arcilloso), donde las tres fracciones del suelo (arena, limo y arcilla) se encuentran distribuidas equitativamente y le da al suelo caracteres de buena retención de agua, moderado drenaje, entre otras propiedades. Ausencia de carbonato de calcio ($\text{CaCO}_3 = 0\%$), debido al pH ligeramente ácido ($\text{pH} = 6,19$), que solubiliza el calcáreo y favorece la disponibilidad de la mayoría de nutrientes. Es un suelo libre de exceso de sales ($\text{CE} = 0,53 \text{ ds/m}$) debido a que la precipitación pluvial promedio de la zona de estudio favorece el lavado del exceso de sales en el suelo. Tiene alto contenido de fósforo disponible ($\text{P disponible} > 14 \text{ ppm}$), debido a la aplicación de fuentes fertilizantes. El contenido de materia orgánica es de nivel medio ($\text{MO} = 2 - 4\%$), que indica la necesidad de agregar materiales orgánicos al suelo para su mejora. El potasio tiene niveles medios ($\text{K disponible} = 100 - 240 \text{ ppm}$), que también indica necesidad de aportes de este elemento para el normal crecimiento de las plantas cultivadas. La capacidad de intercambio catiónico es moderadamente alta ($\text{CIC} = 12 - 20 \text{ meq/100 g}$), que le da al suelo la capacidad de almacenar nutrientes. La fertilidad de este suelo es media, debido al contenido medio de materia orgánica y potasio disponible. Los datos están presentados en la tabla 7, y han sido interpretados con base en la Guía de interpretación de análisis de suelos que se presenta en el anexo 3.

Tabla 4

Resultados del análisis de cadmio en el suelo

Parámetro	Unidad de medida	Resultado
Cadmio total	mg/kg	31,98

Fuente: Laboratorio de Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima.

El análisis de cadmio total en el suelo presenta un nivel superior al Estándar de Calidad Ambiental de Suelo del Perú (37), cuyo valor es 1,4 mg/kg y el dato encontrado en el suelo agrícola del distrito El Mantaro es 31,98 mg/kg, casi 23 veces más en concentración. Este suelo contaminado con cadmio es regado con aguas del río Mantaro y estaría contaminando los cultivos.

4.1.2 Contenido de cadmio en la raíz

Tabla 5

Descripción del contenido de cadmio en la raíz (mg/kg)

	TRATAMIENTOS					
		Porcentaje en peso de estiércol (2 kg de suelo)				
		0 %	3 %	6 %	9 %	12 %
REPETICIONES	I	1,30	3,43	1,63	4,41	0,88
	II	1,21	2,15	12,39	11,55	0,57
	III	1,67	4,17	1,47	31,25	4,01

Fuente: Laboratorio de Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima

• Prueba de Shapiro – Wilk para la normalidad de datos

Ho: la distribución de los datos es normal.

Ha: la distribución de los datos no es normal.

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 6

Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk para contenido de cadmio en la raíz.

En cada uno de los tratamientos

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Tratamiento 0 %	0,890	3	0,355
Tratamiento 3 %	0,977	3	0,708
Tratamiento 6 %	0,761	3	0,024
Tratamiento 9 %	0,932	3	0,496
Tratamiento 12 %	0,817	3	0,156

Fuente: elaboración propia

Decisión: de acuerdo con la tabla 6, en el tratamiento 3 se rechaza la Ho, porque es menor al nivel de significancia. Es decir, los datos analizados no son normales, por esta razón, para este tratamiento se realizó la prueba no paramétrica de Krusk - Wallis.

- **Prueba de Hipótesis**

Ho: la concentración de cadmio es igual en los 5 tratamientos

Ha: al menos un tratamiento es diferente a los demás.

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 7

Prueba de Krusk - Wallis – rangos

Estadísticos de Prueba						
	Tratamientos	N	promedio (mg/kg)	Chi – cuadrado	GL	SIG
cd_raiz	0 %	3	4,33	8,233	4	0,083
	3 %	3	9,33			
	6 %	3	8,33			
	9 %	3	13,33			
	12 %	3	4,67			
	Total	15				

Fuente: elaboración propia

Decisión: la prueba de Kruskal -- Wallis indica que, en el contenido de cadmio en la raíz, sobresale el 13,33 mg/kg (tratamiento 9 %) y el mínimo valor es de 4,33 mg/kg (tratamiento 0%), por no tener estiércol de lombriz. Estos valores evidencian los beneficios de la acumulación y fitoestabilización.

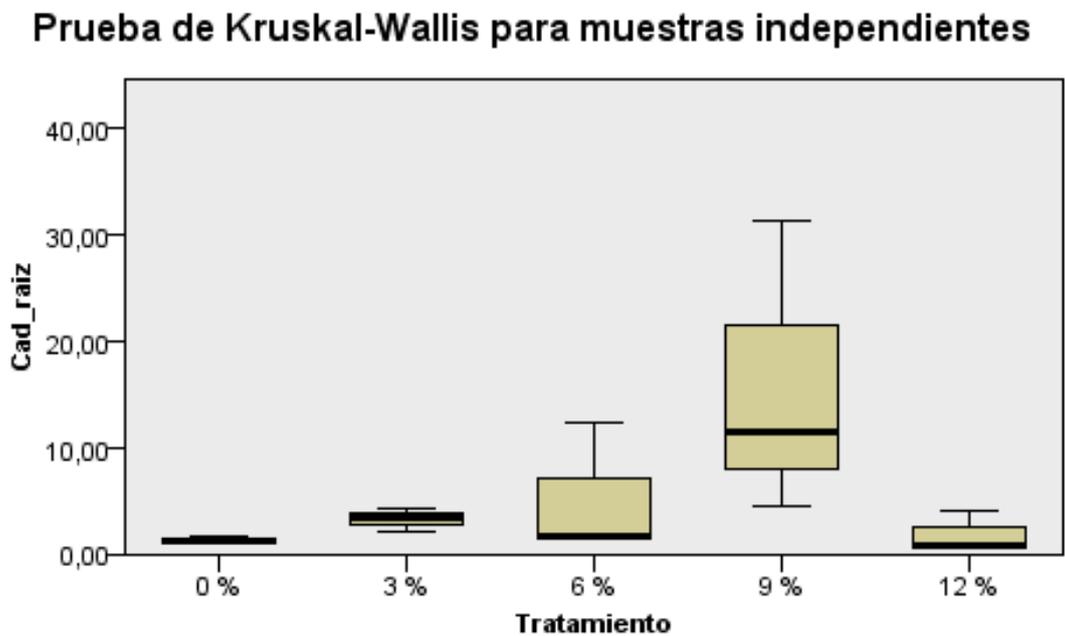


Figura 1. Diagrama de caja de la Prueba de Kursk - Wallis para el contenido de cadmio en la raíz

Decisión: en el diagrama de caja se puede observar que el tratamiento con mayor contenido de cadmio es el tratamiento con 9 %. El mínimo es el tratamiento con 0 %, por no tener estiércol de lombriz. Estos valores evidencian los beneficios de la acumulación y fitoestabilización

4.1.3 Contenido de cadmio en la parte aérea

Tabla 8

Descripción del contenido de cadmio en la parte aérea (mg/kg)

	TRATAMIENTOS					
	Porcentaje en peso de estiércol (2 kg de suelo)					
REPETICIONES		0 %	3 %	6 %	9 %	12 %
	I	0,39	0,29	0,73	1,85	1,64
	II	0,91	0,43	1,35	1,60	1,46
	III	0,48	1,29	2,49	1,51	1,14

Fuente: Laboratorio de Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima

- **Prueba de Shapiro – Wilk para la normalidad de datos**

Ho: la distribución de los datos es normal.

Ha: la distribución de los datos no es normal.

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 9

Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk para contenido de cadmio en la parte aérea

	Shapiro - Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Tratamiento 0 %	0,875	3	0,311
Tratamiento 3 %	0,972	3	0,677
Tratamiento 6 %	0,853	3	0,248
Tratamiento 9 %	0,931	3	0,493
Tratamiento 12 %	0,975	3	0,694

Fuente: elaboración propia

Decisión: de acuerdo con la tabla 10, en todos los tratamientos (1, 2, 3, 4 y 5) se acepta la Ho. Es decir, todos los datos analizados son normales y se procedió al ANOVA.

- **ANOVA (Análisis de varianza)**

Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$

Ha: $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5$ (al menos una μ_i es diferente a los demás)

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 10

Análisis de Varianza del cadmio en la parte aérea

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculado	P –valor
Entre grupos	3,001	4	0,750	2,971	0,074
Dentro de grupos	2,525	10	0,253		
Total	5,526	14			

Fuente: elaboración propia

Decisión: se acepta la Ho, es decir no existe diferencias entre los tratamientos con un nivel de significancia del 0,05. La cantidad de cadmio acumulada en la parte aérea no presenta diferencias significativas ($p = 0,074$)

Con la finalidad de realizar una comparación múltiple entre los tratamientos se realizó la prueba de Duncan.

- **Prueba de DUNCAN**

Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$

Ha: $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5$ (al menos una μ_i es diferente a los demás)

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 11

Prueba de Duncan para los tratamientos del contenido de cadmio en la parte aérea

Tratamientos	N	Promedio (mg/kg)	Significación
Tratamiento 0 %	3	0,5933	B
Tratamiento 3 %	3	0,6700	B
Tratamiento 12 %	3	1,4133	Ab
Tratamiento 6 %	3	1,5233	Ab
Tratamiento 9 %	3	1,6533	A

Fuente: elaboración propia

Decisión: se rechaza H_0 y se acepta H_a .

En la tabla se observa que el grupo A contiene los tratamientos 6 %, 9 %, 12% y el grupo B contiene los tratamientos 0 %, 3 %, 6 % y 12 %, el resultado de 1,4133 mg/kg (tratamiento 12 %) y el resultado de 1,5233 mg/kg (tratamiento 6%) comparten ambos grupos lo cual no son estadísticamente significativos, el resultado de 0,5933 mg/kg (tratamiento 0 %) , el resultado 0,6700 mg/kg (tratamiento 3 %) y el resultado 1,6533 mg/kg (tratamiento 9 %) solo comparten una letra, lo cual quien tiene mayor significación es el 1,6533 mg/kg con el tratamiento 9 %, este resultado indica la asimilación adecuada de la planta con el estiércol de lombriz.

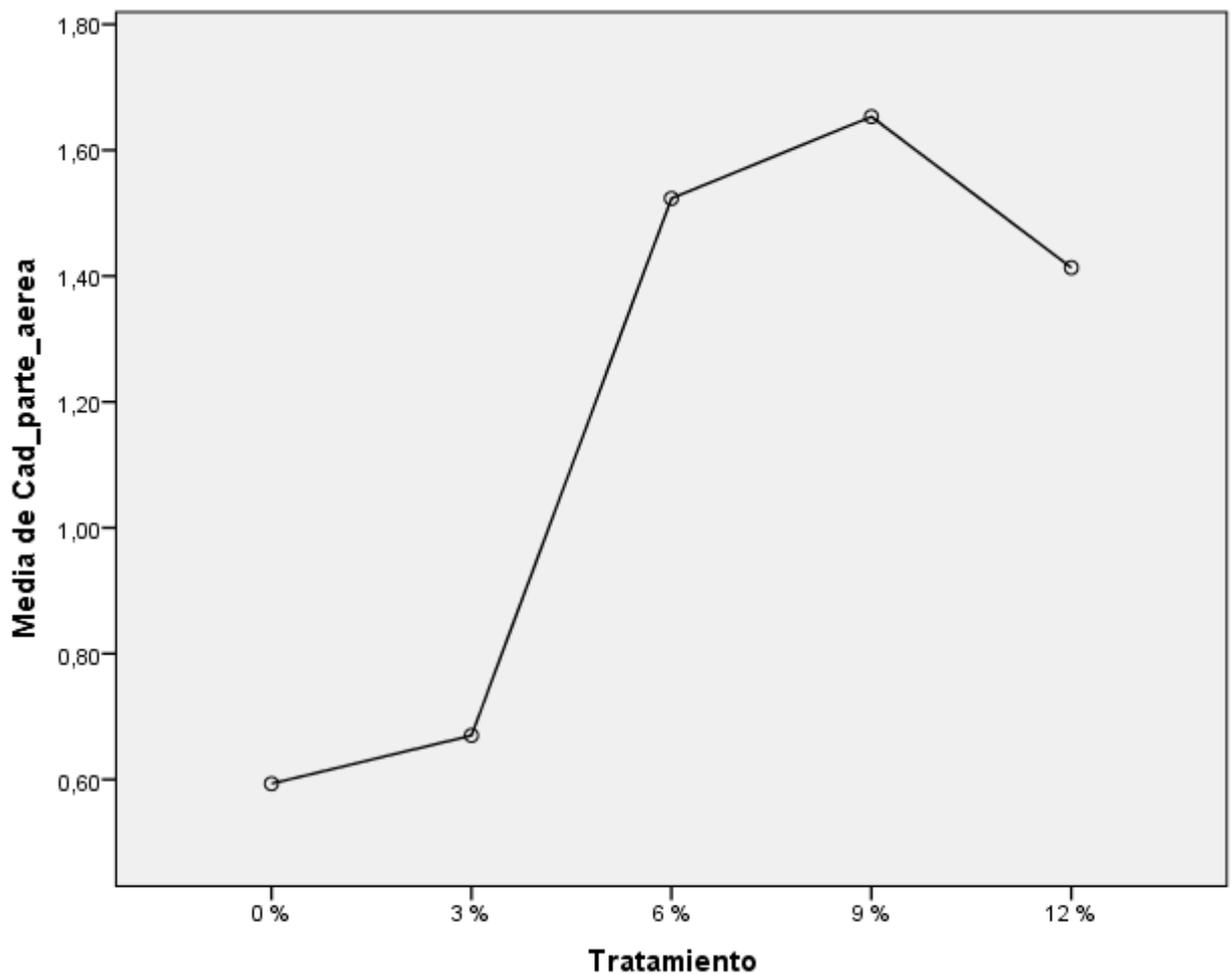


Figura 2. Diagrama de medias para el contenido de cadmio en la parte aérea

Decisión: el diagrama de medias se puede observar que el más alto es el tratamiento con 9 % y que le siguen los tratamientos con 6 % y el tratamiento con 12 %, este resultado indica la asimilación adecuada de la planta con el estiércol de lombriz.

Factor de bioconcentración de cadmio

Tabla 12

Descripción del contenido de bioconcentración de cadmio en la raíz

REPETICIONES	TRATAMIENTOS				
	Porcentaje en peso de estiércol (2 kg de suelo)				
	0 %	3 %	6 %	9 %	12 %
I	0,04065	0,10725	0,05097	0,13790	0,02752
II	0,03784	0,06723	0,03877	0,36116	0,01782
III	0,05222	0,13039	0,04597	0,97717	0,12539

Fuente: Laboratorio de Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima

- **Prueba de Shapiro – Wilk para la normalidad de datos**

Ho: la distribución de los datos es normal.

Ha: la distribución de los datos no es normal.

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 13

Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk para contenido de bioconcentración de cadmio en la raíz

	Shapiro - Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Tratamiento 0 %	0,890	3	0,354
Tratamiento 3 %	0,977	3	0,708
Tratamiento 6 %	0,989	3	0,802
Tratamiento 9 %	0,932	3	0,496
Tratamiento 12 %	0,817	3	0,156

Fuente: elaboración propia

Decisión: de acuerdo con la tabla 14, en todos los tratamientos (1, 2, 3, 4 y 5) se acepta la Ho. Es decir, todos los datos analizados son normales y se procedió al ANOVA.

- **ANOVA (Análisis de varianza)**

Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$

Ha: $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5$ (al menos una μ_i es diferente a los demás)

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 14

Análisis de Varianza de bioconcentración de cadmio en la raíz

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F calculado	p - valor
Entre grupos	0,451	4	0,113	2,911	0,078
Dentro de grupos	0,387	10	0,039		
Total	0,838	14			

Fuente: elaboración propia

Decisión: se acepta la Ho, es decir no existen diferencias entre los tratamientos con un nivel de significancia de 0,05. El factor de bioconcentración de cadmio en la raíz no presenta diferencias significativas ($p = 0,078$). Con la finalidad de realizar una comparación múltiple entre los tratamientos se realizó la prueba de Duncan.

- **Prueba de DUNCAN**

Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$

Ha: $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5$ (al menos una μ_i es diferente a los demás)

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 15

Prueba de Duncan para los tratamientos de bioconcentración de cadmio en la raíz

Tratamientos	Número de Muestras	Promedio (mg/kg)	Significación
Tratamiento 0 %	3	0,0436	b
Tratamiento 6 %	3	0,0452	b
Tratamiento 12 %	3	0,0569	b
Tratamiento 3 %	3	0,1016	b
Tratamiento 9 %	3	0,4921	a

Fuente: elaboración propia

Decisión: se rechaza H_0 y se acepta H_a .

En la tabla se observa que el grupo A contiene el tratamiento de 9 % con un valor de 0,4921 mg/kg y el grupo B contiene los tratamientos de 0 %, 3 %, 6 % y 12% con valores que varían entre 0,0436 mg/kg y 0,1016 mg/kg. Estos valores concluyen que el tratamiento de 9 % es adecuado para la bioconcentración de cadmio en la raíz pues evidencian el efecto favorable del estiércol de lombriz en el proceso de transferencia del cadmio a la raíz.

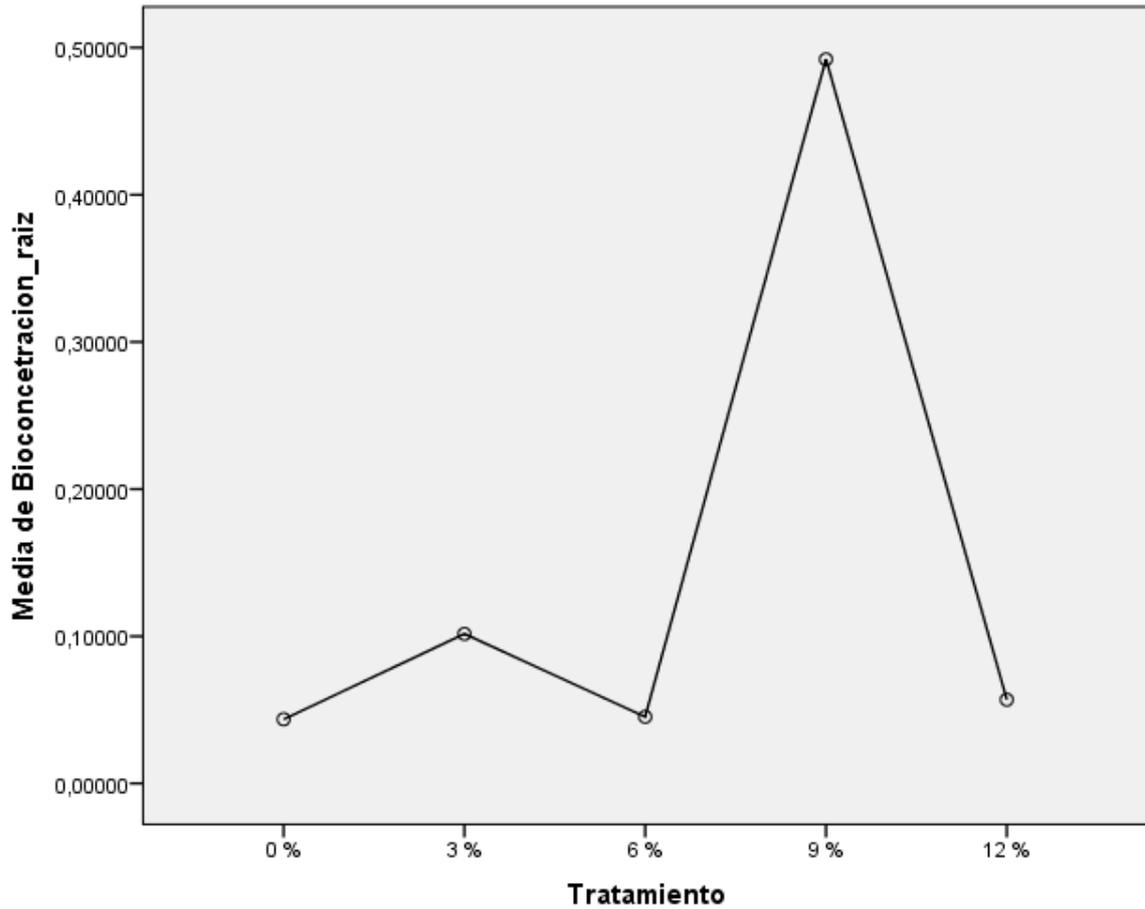


Figura 3. Diagrama de media para la bioconcentración de cadmio en la raíz

Decisión: en el diagrama de media se puede observar que el más alto es el tratamiento con 9 %, donde se evidencia el efecto favorable del estiércol de lombriz en el proceso de transferencia del cadmio a la raíz.

Tabla 16

Descripción del contenido de bioconcentración de cadmio en la parte aérea

	TRATAMIENTOS					
	Porcentaje en peso de estiércol (2 kg de suelo)					
	0 %	3 %	6 %	9 %	12 %	
REPETICIONES	I	0,00127	0,00335	0,00159	0,00431	0,00086
	II	0,00118	0,00210	0,00121	0,01129	0,00056
	III	0,00163	0,00408	0,00144	0,03056	0,00392

Fuente: Laboratorio de Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima

- Prueba de Shapiro – Wilk para la normalidad de datos

Ho: la distribución de los datos es normal.

Ha: la distribución de los datos no es normal.

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 17

Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk para contenido de bioconcentración de cadmio en la parte aérea

	Shapiro - Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Tratamiento 0 %	0,893	3	0,363
Tratamiento 3 %	0,978	3	0,713
Tratamiento 6 %	0,985	3	0,769
Tratamiento 9 %	0,932	3	0,496
Tratamiento 12 %	0,816	3	0,154

Fuente: elaboración propia

Decisión: de acuerdo con la tabla 16, en todos los tratamientos (1, 2, 3, 4 y 5) se acepta la Ho. Es decir, todos los datos analizados son normales y se procedió al ANOVA.

- ANOVA (Análisis de varianza)

Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$

Ha: $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5$ (al menos una μ_i es diferente a los demás)

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 18

Análisis de varianza de bioconcentración de cadmio en la parte aérea

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	F calculado	P – valor
Entre grupos	0,000	4	0,000	2,910	0,078
Dentro de grupos	0,000	10	0,000		
Total	0,001	14			

Fuente: elaboración propia

Decisión: se acepta la Ho, es decir no existen diferencias entre los tratamientos con un nivel de significancia de 0,05. El factor de bioconcentración de cadmio en la parte aérea no presenta diferencias significativas ($p = 0,078$). Con la finalidad de realizar una comparación múltiple entre los tratamientos se realizó la prueba de Duncan.

• **Prueba de DUNCAN**

Ho: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$

Ha: $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5$ (al menos un μ_i es diferente a los demás)

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 19

Prueba de Duncan para los tratamientos de bioconcentración de cadmio en la parte aérea

Tratamientos	Número de Muestras	Promedio (mg/kg)	Significación
Tratamiento 0 %	3	0,0014	B
Tratamiento 6 %	3	0,0024	B
Tratamiento 12 %	3	0,0018	B
Tratamiento 3 %	3	0,0032	B
Tratamiento 9 %	3	0,0154	A

Fuente: elaboración propia

Decisión: se rechaza Ho y se acepta Ha.

En la tabla se observa que el grupo A contiene el tratamiento con 9 % con un valor de 0,0154 mg/kg y el grupo B contiene los tratamientos de 0 %, 3 %, 6 %, 12% con valores que varían entre 0,0014 mg/kg y 0,0032 mg/kg. Estos valores concluyen que el tratamiento

de 9 % es adecuado para la bioconcentración de cadmio en la parte aérea pues evidencian el efecto favorable del estiércol de lombriz en el proceso de transferencia del cadmio a la raíz.

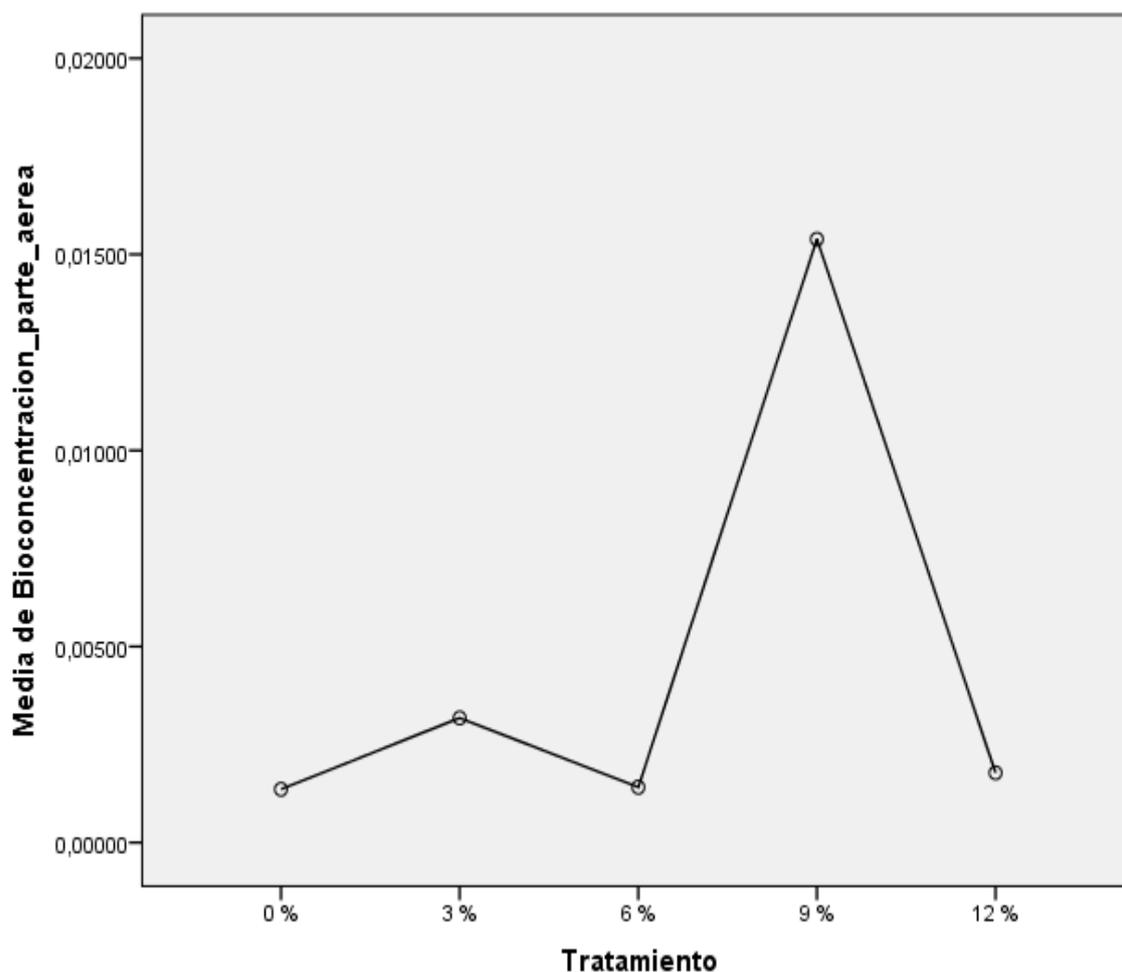


Figura 4. Diagrama de media para la bioconcentración de cadmio en la parte aérea

Decisión: en el diagrama de medias se puede observar que el más alto es el tratamiento con 9 %, donde se evidencia el efecto favorable del estiércol de lombriz en el proceso de transferencia del cadmio a la raíz.

4.1.4 Bioconcentración de cadmio en la raíz y en la parte aérea

Tabla 20

Resultados de bioconcentración de cadmio en la raíz y en la parte aérea

Muestra	Raíz	Parte aérea
1	0,04065	0,00127
2	0,03784	0,00118
3	0,05222	0,00163
4	0,10725	0,00335
5	0,06723	0,00210
6	0,13039	0,00408
7	0,05097	0,00159
8	0,03877	0,00121
9	0,04597	0,00144
10	0,13790	0,00431
11	0,36116	0,01129
12	0,97717	0,03056
13	0,02752	0,00086
14	0,01782	0,00056
15	0,12539	0,00392

Fuente: elaboración propia

- Prueba de Hipótesis unilateral derecha

Ho: μ raíz \leq μ parte aérea

Ha: μ raíz $>$ μ parte aérea

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 21

Prueba de T para la igualdad de medias

	Prueba t para la igualdad de medias		
	t	gl	Sig (bilateral)
BIOCONCENTRACIÓN Se asumen varianzas iguales	2,267	28	0,031
No se asumen varianzas iguales	2,267	14,027	0,040

Fuente: elaboración propia

Se tiene dos valores p – valor, y se escoge el más conveniente para los resultados, para este estudio se escogió el análisis de cola derecha y t (+) 2,267.

El programa de SPSS da como resultado solo pruebas bilaterales, como la tesis es de prueba unilateral y de cola derecha se realiza la siguiente tabla de conversión basado en los resultados mostrados.

	t - negativo	t - positivo
Cola Izquierda	$P = \frac{Sig}{2}$	$P = 1 - \frac{Sig}{2}$
Cola Derecha	$P = 1 - \frac{Sig}{2}$	$P = \frac{Sig}{2}$

Entonces $P = \frac{Sig}{2} = \frac{0.040}{2} = 0,020$

Decisión: se rechaza H_0 y se acepta H_a .

En la prueba T de comparación de medias de bioconcentración de cadmio en la parte aérea y en la raíz, indica que la bioconcentración de la raíz es mayor a la bioconcentración de la parte aérea siendo su valor ($p = 0,020$) con un nivel de significancia de 0,05 debido a la translocación en las plantas es que se inhibe a la parte aérea.

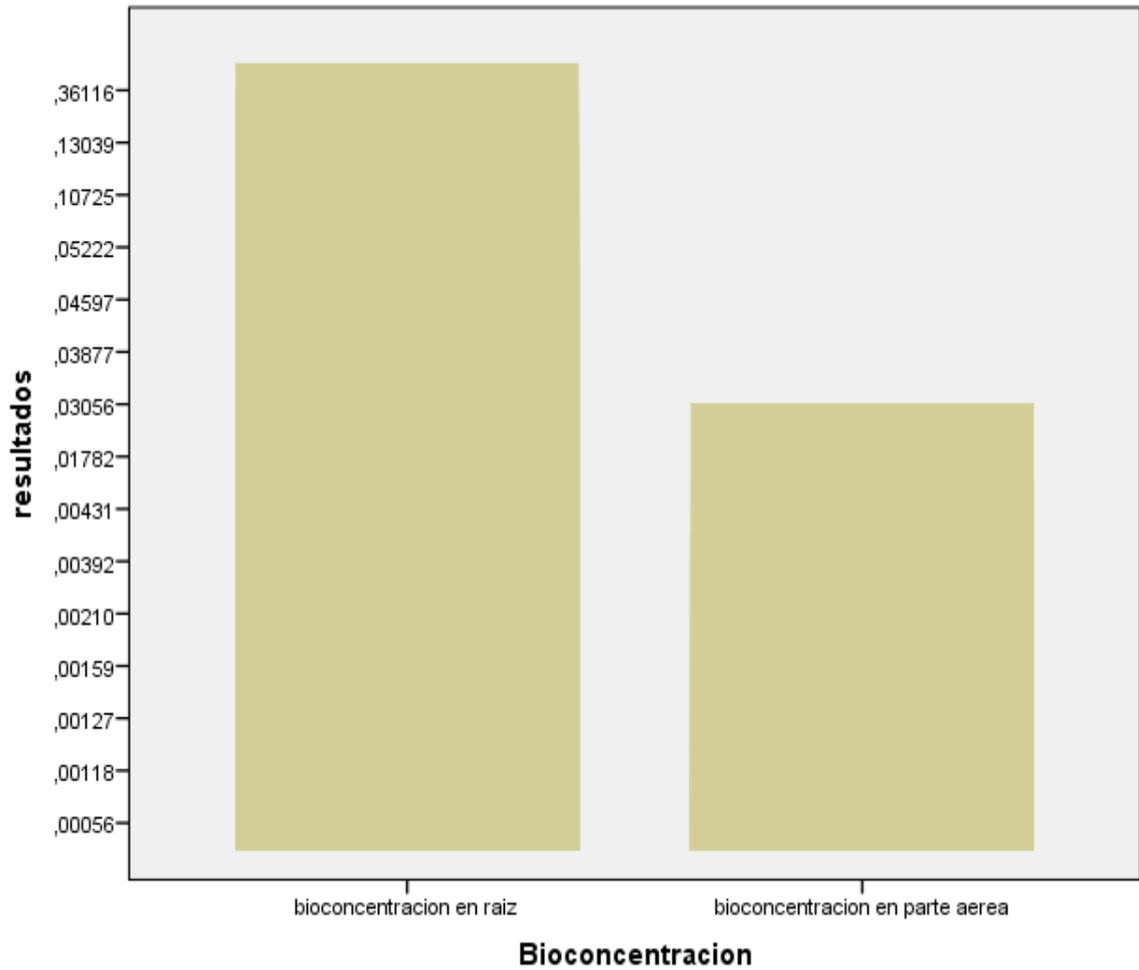


Figura 5. Diagrama de barras para la bioconcentración de cadmio en la raíz y bioconcentración de cadmio en la parte aérea

Decisión: los gráficos muestran que la bioconcentración de la raíz es mayor a la bioconcentración de la parte aérea debido a la translocación en las plantas que se inhibe a la parte aérea.

4.1.5 Crecimiento de la planta de lupino

4.1.5.1 Altura de planta

Tabla 22

Descripción del crecimiento de la planta

	TRATAMIENTO					
	Porcentaje en peso de estiércol (2 kg de suelo)					
REPETICIONES		0 %	3 %	6 %	9 %	12 %
	I	38,7	43,0	41,0	39,2	42,4
	II	41,5	41,3	35,2	38,5	49,0
	III	40,7	39,8	34,1	35,0	42,3

Fuente: elaboración propia

- Prueba de Shapiro – Wilk para la normalidad de datos

Ho: la distribución de los datos es normal.

Ha: la distribución de los datos no es normal.

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 23

Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk para crecimiento de la planta

	Shapiro - Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Tratamiento 0 %	0,942	3	0,537
Tratamiento 3 %	0,999	3	0,931
Tratamiento 6 %	0,866	3	0,284
Tratamiento 9 %	0,871	3	0,298
Tratamiento 12 %	0,761	3	0,025

Fuente: elaboración propia

Decisión: de acuerdo con la tabla 24, en el tratamiento 5 se rechaza la Ho, presenta un valor menor al nivel de significancia. Es decir, los datos analizados no son normales y se realiza el análisis de prueba no paramétrica de Krusk – Wallis.

- **Prueba de Hipótesis**

Ho: la altura de la planta es igual en los 5 tratamientos.

Ha: al menos la altura de una planta es diferente a las demás.

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 24

Prueba de Krusk – Wallis - rangos

Estadísticos de Prueba						
	Tratamientos	N	promedio (cm)	Chi – cuadrado	GL	SIG
Alt _ planta	0 %	3	8,00	9,50	4	0,05
	3 %	3	10,33			
	6 %	3	4,33			
	9 %	3	4,00			
	12 %	3	13,33			
	Total		15			

Fuente: elaboración propia

Decisión: se rechaza la Ho y se acepta la Ha.

La prueba de Krusk - Wallis en el crecimiento de la planta, se observa que sobresale en promedio 13,33 cm (tratamiento 12 %), lo cual demuestra que el estiércol de lombriz no influye en el crecimiento de la raíz, pues es debido que no todas las semillas crecen a la misma medida, no todas son iguales.

Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes

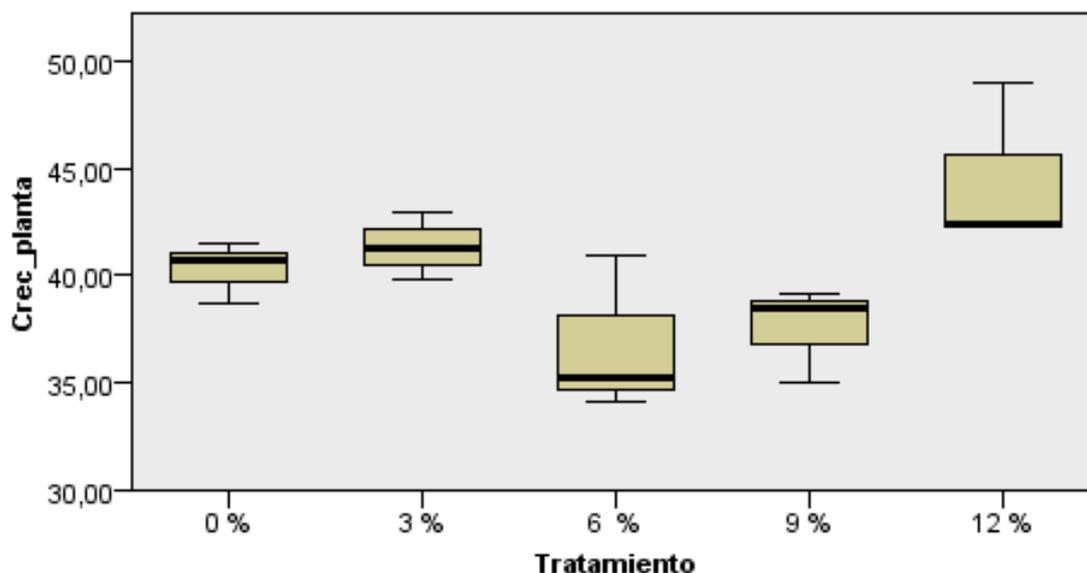


Figura 6. Diagrama de cajas para el crecimiento de la planta

Decisión: el diagrama de caja muestra que el mayor valor es del tratamiento con 12 %, lo cual demuestra que el estiércol de lombriz no influye en el crecimiento de la raíz, pues es debido que no todas las semillas crecen a la misma medida, no todas son iguales.

4.5.1.2 Longitud de la raíz

Tabla 25

Descripción del crecimiento de la raíz

		TRATAMIENTOS				
		Porcentaje en peso de estiércol (2 kg de suelo)				
		0 %	3 %	6 %	9 %	12 %
REPETICIONES	I	23,80	18,70	20,20	17,70	23,80
	II	23,0	14,40	21,70	15,40	23,00
	III	19,40	18,60	15,40	14,50	21,70

Fuente: elaboración propia

- **Prueba de Shapiro – Wilk para la normalidad de datos**

Ho: la distribución de los datos es normal.

Ha: la distribución de los datos no es normal.

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 26

Prueba de normalidad de Shapiro – Wilk para crecimiento de la raíz

	Shapiro - Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Tratamiento 0 %	0,881	3	0,328
Tratamiento 3 %	0,767	3	0,039
Tratamiento 6 %	0,916	3	0,439
Tratamiento 9 %	0,940	3	0,527
Tratamiento 12 %	0,981	3	0,739

Fuente: elaboración propia

Decisión: de acuerdo con la tabla 28, en el tratamiento 2 se rechaza la Ho, porque es menor al nivel de significancia. Es decir, los datos analizados no son normales y se realiza el análisis de prueba no paramétrica de Krusk – Wallis.

- **Prueba de Hipótesis**

Ho: la altura de la raíz es igual en los 5 tratamientos.

Ha: al menos una altura de la raíz es diferente a las demás.

Nivel de significación $\alpha = 0,05$

Tabla 27

Prueba de Krusk - Wallis – rangos

Estadísticos de prueba						
	Tratamiento	N	promedio (cm)	Chi – cuadrado	GL	Sig
Long_ raíz	0 %	3	11,67	9,845	4	0,043
	3 %	3	4,67			
	6 %	3	7,67			
	9 %	3	3,50			
	12 %	3	12,50			
	Total		15			

Fuente: elaboración propia

Decisión: se rechaza la Ho y se acepta la Ha.

La prueba de Krusk - Wallis en el crecimiento de la raíz, se observa que sobresale en promedio 12,50 cm (tratamiento 12 %), lo cual demuestra que el estiércol de lombriz no influye en el crecimiento de la raíz, pues es debido a que no todas las semillas crecen a la misma medida, no todas son iguales.

Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes

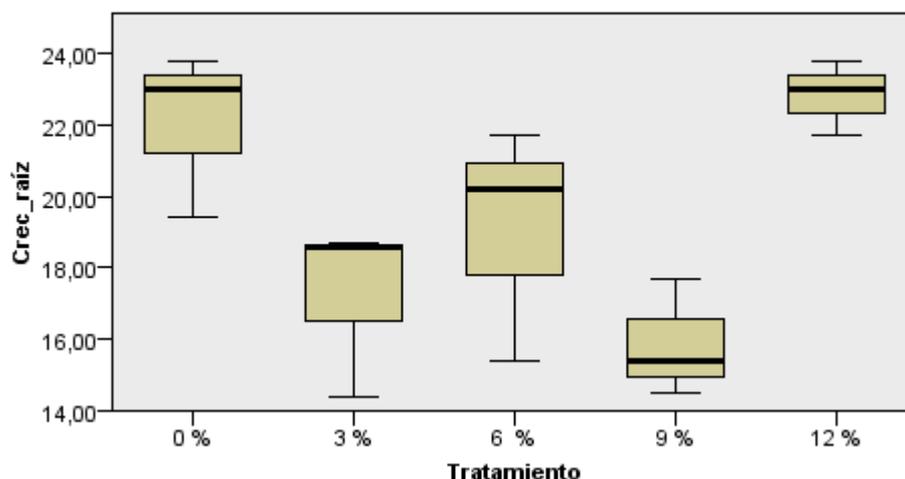


Figura 7. Diagrama de cajas del crecimiento de la raíz

Decisión: se observa que sobresale el tratamiento con 12 %, y el tratamiento con 0 %, lo cual demuestra que el estiércol de lombriz no influye en el crecimiento de la raíz, pues es debido a que no todas las semillas crecen a la misma medida, no todas son iguales.

4.2 Discusión

4.2.1 Contenido de cadmio en la raíz

El contenido total de cadmio en las raíces de lupino alcanzó un valor promedio de 13,33 mg/kg con el tratamiento de 9 % de estiércol de lombriz. Estos valores encontrados en *L. mutabilis* están dentro del rango encontrado. En la evaluación de la capacidad fitorremediadora de *Lupinus ballianus* se acumuló cadmio en las raíces en una concentración de 287,3 mg/kg, creciendo en un sustrato de relave de mina (17).

El cadmio absorbido por *L. mutabilis* se debe a uno de los caracteres del proceso en sí, que está referido a la biodisponibilidad relativamente alta de este metal pesado en el suelo (29). Otro carácter de la transferencia del cadmio del suelo a la planta es la absorción no regulada; es decir que la absorción de cadmio no está regulada por límites fisiológicos (demanda de la planta) y la absorción no aumenta con el incremento de concentraciones de cadmio en el suelo (30).

Una relación importante a establecer en los trabajos de investigación publicados anteriormente, es que la mayor concentración de cadmio encontrada en raíces, por

ejemplo, de *Setaria verticilata*, se debe a la mayor concentración de cadmio aplicada al suelo (16). Esto es corroborado en el trabajo de Pichtel y Bradway, que tuvo como uno de sus objetivos determinar la magnitud de absorción de Pb, Cd y Zn usando especies de plantas en un estudio de invernadero, concluyéndose que las concentraciones de metales totales en el suelo tuvieron una marcada influencia sobre la absorción de la planta (15).

Asimismo, cabe mencionar que, en México, localidad de Durango, al desarrollar el trabajo de Calzada, Galaviz y Trejo. Con el objetivo de identificar especies de pastos para ser utilizadas como especies fitoestabilizadoras de suelos contaminados, se encontró que *Setaria verticilata* L. acumuló significativamente mayor cantidad de cadmio y plomo en la raíz y mayor concentración de cadmio en tejidos aéreos que *Cenchrus ciliaris* L. (16). Esto demuestra que el cadmio en otras especies también presenta mayor acumulación en la raíz.

4.2.2 Contenido de cadmio en la parte aérea

El contenido de cadmio en la parte aérea presenta valores de 1,653, 1,523 y 1,413 mg/kg, del tratamiento de 9 %, 6 % y 12 %, siendo el 0,91 al 7,79 % de contenido en la planta lo que demuestra que el cadmio del suelo contaminado se transfiere principalmente a la raíz de lupino, antes que, a la parte aérea, y estaría validando a esta especie vegetal como fitoestabilizadora, porque este metal pesado queda retenido en la raíz.

Estos datos están entre el rango de los valores encontrados en el trabajo de Lehmann y Rebele. con valores de 0,30 a 9,20 mg/kg, siendo solo el 4 % al 7 % de cadmio de la planta acumulados en los tejidos de la parte aérea; los autores de este trabajo concluyen que el uso práctico de *Calamagrostis epigejos* para fitorremediación no está principalmente en el campo de la fitoextracción, sino en la fitoestabilización. La absorción de cadmio disponible y la acumulación en el sistema radicular puede prevenir posteriormente la lixiviación en el agua de riego (13).

4.2.3 Factor de bioconcentración

En la bioconcentración de cadmio en la raíz sobresale el tratamiento de 9 % con un promedio de 0,4921 mg/kg, en los otros 4 tratamientos los valores varían entre 0,0436 mg/kg y 0,1016 mg/kg con diferencias mínimas. En la bioconcentración en la parte aérea sobresale el tratamiento de 9 % con un promedio de 0,0154 mg/kg, los otros tratamientos tienen diferencias mínimas los cuales varían entre 0,0014 mg/kg y 0,0032 mg/kg. Ambos

resultados evidencian que el tratamiento de 9 % presenta un factor de bioconcentración mayor en la raíz en comparación con la parte aérea, lo cual demuestra la baja translocación de cadmio en la planta tanto en la parte aérea como en la raíz.

Estos datos concuerdan con lo reportado en el trabajo de investigación de: Ehsan y Santamaría-Delgado, donde la máxima concentración de Cd en la parte aérea fue de 540 mg Cd/kg en el tratamiento con 27 mg Cd/kg suelo, evidenciando la pobre translocación de cadmio de las raíces a los tallos con una relación tallo:raíz <1, sugiriéndose utilizar *Lupinus uncinatus* para fitoestabilización y revegetación de suelos contaminados con cadmio.

4.2.4 Crecimiento de lupino

Los resultados del crecimiento de *L. mutabilis*, evaluado a través de la materia seca y altura de planta, presenta al tratamiento con mayor dosis de estiércol de lombriz, 12 %, con mayor altura en la planta y la raíz ($p=0,050$) Esto evidencia el efecto favorable del estiércol de lombriz como enmienda orgánica en la mejora de las propiedades del suelo contaminado con cadmio de El Mantaro y mayor crecimiento de la parte aérea de *Lupinus mutabilis*.

Los datos encontrados en el presente trabajo de investigación con *L. mutabilis* demuestran que esta especie vegetal es una alternativa para la fitoestabilización debido a que no se encontró efectos negativos del cadmio en las plantas y los tratamientos favorecieron su crecimiento, además de concentrar cadmio en la raíz. Esto fue similar a lo encontrado en el trabajo de Madejón, Burgos, Cabrera y Madejón; donde se tuvo como objetivos, entre otros, el posible uso de esta planta para propósitos de estabilización; los resultados encontrados no mostraron efectos negativos sobre el crecimiento de las plantas y contenido de nutrientes en suelos contaminados tratados con compost y cal; el contenido de cadmio y zinc estuvo dentro de los niveles normales en las plantas y el romero podría ser una opción confiable para una fitoestabilización exitosa de suelos moderadamente contaminados con elementos traza (14).

El suelo del distrito de El Mantaro, utilizado en este experimento tiene una concentración promedio de cadmio de 31,98, casi 22 veces más que el Límite Máximo Permisible del ECA de suelos del Perú; es un suelo de fertilidad media, necesitando aportes de materia orgánica y potasio para mejorar la disponibilidad de nutrientes.

Esta tesis proporciona una alternativa de solución en el ámbito ambiental porque disminuirá cantidades de metales pesados como el cadmio, *L. mutabilis*, se recomienda para las remediaciones de suelos contaminados, como en la minería o la agricultura; se recomienda dicha planta para la absorción del metal en la raíz, no afectará en el crecimiento y en la parte aérea.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

1. *L. mutabilis* tiene un alto potencial en la fitoestabilización, la cantidad de cadmio fitoestabilizado es de 13,33 mg/kg con el tratamiento de 9%.
2. El factor de bioconcentración de cadmio más alto en la raíz de *L. mutabilis* fue de 0,4921mg/kg con el tratamiento de 9 % de estiércol de lombriz y en la parte aérea fue de solo 0,0154 mg/kg con la misma dosis de estiércol de lombriz.
3. El crecimiento de *L. mutabilis* en la parte aérea fue con el tratamiento del 12 % con un promedio de altura de 13,33 cm y en el crecimiento de la raíz fue el tratamiento del 12 % con un promedio del 12, 50 cm, no influye el suelo contaminado ni la cantidad de estiércol de lombriz.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar el estiércol de lombriz como abono orgánico para el suelo y cosechar el *L. Mutabilis* a los alrededores del distrito de El Mantaro, lo cual va a generar un efecto favorable en el suelo.
2. Estudiar a *Rosmarinus officinalis* (romero), como planta fitoestabilizadora en los suelos del Valle el Mantaro, así como otras especies vegetales.
3. Evaluar la fitoestabilidad de cadmio en especies vegetales del valle del Mantaro y su relación con la disponibilidad de nutrientes en suelos contaminados con metales pesados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **CARITAS**. Fortalecimiento de las capacidades locales para la descontaminación y recuperación de la cuenca del Mantaro, mediante la implementación de gestión ambiental para contribuir al desarrollo sostenible de la región Junín: Caritas, 2007. Vol 1.
2. **WEIL, R. R., and N.C. BRADY**. *The Nature and Properties of soils*. New York: Pearson, 2008.
3. **MARQUES A.P., A.O.S.S. RANGEL and P.M.L.** *Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils*. New York: s.n., 2009.
4. **SING, O.V., LABANA, S., PANDEY, G., BUDHIRAJA R., and JAIN, R.K.** *Phytoremediation: An overview of metallic ion decontamination from soil*. 2003.
5. **WONG, M.W.** *Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils*. s.l.: Chemosphere, 2003. 775 - 780.
6. **MILLS, T., NORTHCOTT, G., VOGELER, I., ROBINSON, B., NORLING, C., LEONIL, D., ARNOLD, B., SIVAKUMARAN.** *Phytoremediation and Long-term site management of soil contaminated with pentachlorophenol (PCP) and heavy metals*. *Journal of Environmental Management*. 2006. 232 -241.
7. **DATTA, R., SARKAR, D.** *Phytoextraction of Zn and Cd from soils using hyper-accumulator plants*. New York: s.n., 2005.
8. **MENCH, M., VANGRONSVELD, H., CLISTERS, N., LEPP, W., EDWARDS, R.** *In situ metal immobilization and phytostabilization of contaminated soils*. In: **Terry, N., Banuelos, G. (Eds.)**. *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. 2000.
9. **BERTI, W.R., and CUNNINGHAM, S.D.** *Phytostabilization of metals*. In *Ras Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment*. New York: s.n., 2000. 71 - 88.
10. **MARQUES, A.P.G.C., OLIVERA, R.S., RANGEL, A.O.S.S., and CASTRO, P.M.L.** *Application of manure and domestic sludge compost to contaminated soils and its effect on zinc accumulation by *Solanum nigrum* inoculated with different arbuscular mycorrhizal fungi*. 2007. 608 - 620.
11. **VÁSQUEZ, S., CARPENA, R.O. and BERNAL, M.P.** *Contribution of heavy metals and As-loaded lupin root mineralization to the availability of the pollutants in multi-contaminated soils*. 2008. 373 - 379.
12. **MAINS, D., CRAW, D. RUFAUT, C.G. and SMITH, C.M.S.** *Phytostabilization of gold mine tailings, New Zealand. Part 1: Plant Establishment in Alkaline Saline Substrate*. *International Journal of Phytoremediation*. 2006. 131 - 147.

13. **LEHMANN, C. and REBELE, F.** *Assessing the Potential for Cadmium Phytoremediation with Calamagrostis epigejos: A Pot Experiment. International Journal of Phytoremediation.* 2004. 169 -183.
14. **MADEJÓN, P., BURGOS, P., CABRERA, F. and MADEJÓN, E. (2009).** *Phytostabilization of amended soils polluted with trace elements using the Mediterranean shrub: Rosmarinus officinalis. International Journal of Phytoremediation.* 2009. 542 - 557.
15. **PICHEL J., and BRADWAY, D.J.** *Conventional crops and organic amendments for Pb, Cd and Zn treatment at a severely contaminated site. Bioresource Technology* 99: 2008. 1242 - 1251.
16. **CALZADA, GALAVIZ, L. A.D. y TREJO, R.** *Uso de Cenchrus ciliaris L. y Setaria Verticilata L. en la fitoestabilización de suelos contaminados con plomo y cadmio.* 2011. 27 - 31.
17. **JARA-PEÑA, E., GÓMEZ, J., MONTOYA, H., CHANCO, M. MARIANO, M. y CANO, N.** *Capacidad Fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados.* s.l.: 145 - 154, 2014.
18. **EHSAN, M., SANTAMARÍA - DELGADO, A., VÁSQUEZ - ALARACÓN, A., ALDERETE - CHÁVEZ, N., DE LA CRUZ-LANDERO, JAÉN-CONTRERAS and P. AUGUSTINE MOLUMELI.** *Phytostabilization of cadmium contaminated soils by Lupinus uninus Schldl. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.* 2009. 390 - 397.
19. **VÁSQUEZ S., R. AGHA, A. GRANADO, M.J. SARRO, E. ESTEBAN, J.M. PEÑALOSA and R.O. CARPENA.** *Use of White lupin plant for phytostabilization of Cd and As polluted acid soil. Water, Air, and Soil Pollution.* 2006. 349 - 365.
20. **EPA.** *Introduction to Phytoremediation. National Risk Management Research Laboratory. Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati . USA : s.n., 2000.*
21. **BRADY, WEIL R.R. and N.C.** *The nature and properties of soils. Fifteenth edition. Pearson. . New York. USA: s.n., 2016.*
22. **PORTA C.J., M. LÓPEZ - ACEVEDO R., y C. ROQUERO DE LABURU.** *Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Tercera edición. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España: s.n., 2003.*
23. **EPA.** *Liners and Leak Detection for Hazardous Waste Land Disposal Units.* 1997. 20218 -20311.
24. **CUNNINGHAM, S.D. and W.R. BERTI, and J.W. HUANG (1995).** *Phytoremediation of Contaminated Soils.* 2001. 393 - 397.
25. **SMOLDERS, E. and J. MERTENS. CADMIUM. B.J. ALLOWAY (ed.).** *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability, Environmental Pollution* 22, DOI. Springer Science+Business Media Dordrecht. 2013.

26. **CHEN, W., Li, L., CHANG, A.C., Wu, L., CHANEY, R.L., SMITH, R., et al.** *Characterizing the solid -solution partitioning coefficient and plant uptake factor As, Cd, and Pb in California croplands. Agriculture, Ecosystems and Environment.* 2013. 212 - 220.
27. **CHRISTENSEN, T.H.** *Cadmium soil sorption at low concentrations. I. Effect of time, cadmium load, pH, and calcium. Water, Air, and Soil Pollution.* 1984. 105 - 114.
28. **BUEKERS, J., DEGRYSE, F., MAES, A., & SMOLDERS, E. MODELLING.** *The effects of ageing on Cd, Zn, Ni and Cu solubility in soils using an assemblage model. European Journal of Soil Science.* 2008. 1160 - 1170.
29. **MCLAUGHLIN, M.J., WHATMUFF, M., WARNE, M., HEEMSBERGEN, D., BARRY, G., BELL, M., et al.** *A field investigation of solubility and food chain accumulation of biosolid-cadmium across diverse soil types. s.l.: 428 - 432, 2006.*
30. **BROWN, S., CHANEY R., ANGLE J.S. and RYAN J.A.** *The phytoavailability of cadmium to lettuce in long-term biosolid amended soil.*1998. 1071 - 1078.
31. **Li, Y.M., CHANEY, R.L., SCHNEITER, A.A., MILLER, J.F., ELIAS, E.M., & HAMMOND, J.J. SCREENING.** *For low grain cadmium phenotypes in sunflower, durum wheat and flax.*1997. 23 - 30.
32. **PORTA, J. y LÓPEZ, M. (2014).** *Edafología Uso y protección de suelos. 3° ed.).* 2014. 254.
33. —. *Edafología Uso y protección de suelos.* 2014. 255.
34. **SALT, D.E., M. BLAYLOCK, P.B.A. NANDA KUMAR, V. DUSHENKOV, B.D. ENSLEY, I. CHET, and I. Raskin. .** *Phytoremediation: A Novel Strategy for the Removal of Toxic Metals from the Environment Using Plants.* 1995. 468 - 474.
35. **MISRA, S.G. and D. MANI.** *Soil Pollution. APH Publishing Corporation. New Delhi.* 2012.
36. **PATERSON, S., D. MACKAY, D. TAM, and W.Y. SHIU.** *Uptake of Organic Chemicals by Plants: A Review of Processes, Correlations and Models.* 1990. 297 - 331.
37. **MINAM.** *Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo. D.S. N° 002 - 2013-MINAM. .* 2013.
38. **ELORZA, A.** EL 16 % del suelo vasco está afectado por la contaminación. *El país.* 5, 7 de mayo de 2014.
http://ccaa.elpais.com/ccaa/2014/05/06/paisvasco/1399387670_789183.html.
39. **SÁNCHEZ, B.** EL arsénico de una antigua mina amenaza los acuíferos de Guadalix. *España.* 10, 21 de octubre de 2014.
http://ccaa.elpais.com/ccaa/2014/10/21/madrid/1413914382_433189.html.

40. **SANZ, D.** Suelos contaminados por plomo. *Ecología verde*. [En línea] Merda; 20 de marzo de 2013.

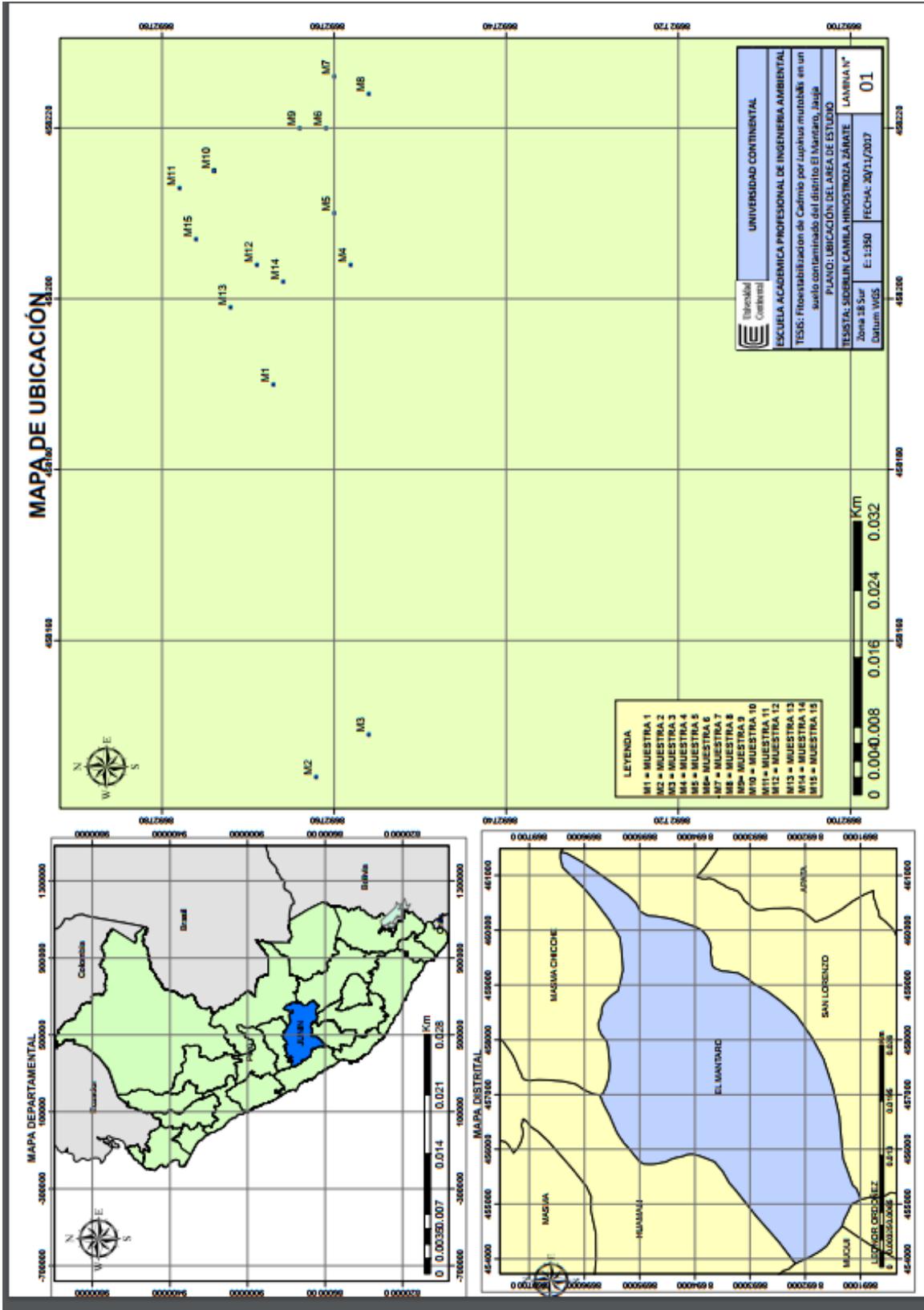
<http://www.ecologiaverde.com/suelos-mexicanos-contaminados-por-plomo/>.

41. **TORRIE, STEEL R.G.D. y J.H.** *Bioestadística: principios y procedimientos*. Colombia: s.n., 1985.

ANEXOS

ANEXO 1

Ubicación de las muestras



ANEXO 2

Georreferenciación de los puntos de muestreo

Nº Muestra simple	Zona	Este	Norte	Altitud
1	18 L	458190	8692767	3335
2	18 L	458144	8692762	3339
3	18 L	458149	8692756	3338
4	18 L	458204	8692758	3341
5	18 L	458210	8692760	3341
6	18 L	458220	8692761	3338
7	18 L	458226	8692760	3338
8	18 L	458224	8692756	3341
9	18 L	458220	8692764	3337
10	18 L	458215	8692774	3336
11	18 L	458213	8692778	3337
12	18 L	458204	8692769	3346
13	18 L	458199	8692772	3340
14	18 L	458202	8692766	3339
15	18 L	458207	8692776	3337

Fuente: elaboración propia

ANEXO 3

Datos originales de los parámetros evaluados

Tabla 1. Datos originales de contenido de cadmio en la raíz (mg/kg)

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
1: 0 % Estiércol de lombriz	1,30	1,21	1,67
2: 3 % Estiércol de lombriz	3,43	2,15	4,17
3: 6 % Estiércol de lombriz	1,63	1,24	1,47
4: 9 % Estiércol de lombriz	11,55	31,25	0,88
5: 12 % Estiércol de lombriz	0,88	0,57	4,01

Tabla 2. Datos originales de contenido de cadmio en la parte aérea (mg/kg)

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
1: 0 % estiércol de lombriz	0,39	0,91	0,48
2: 3 % estiércol de lombriz	0,29	0,43	1,29
3: 6 % estiércol de lombriz	0,73	1,35	2,49
4: 9 % estiércol de lombriz	1,85	1,60	1,51
5: 12 % estiércol de lombriz	1,64	1,46	0,04

Tabla 3. Datos originales del Factor de Bioconcentración de cadmio en la raíz

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
1: 0 % estiércol de lombriz	0,04065	0,03784	0,05222
2: 3 % estiércol de lombriz	0,10725	0,06723	0,13039
3: 6 % estiércol de lombriz	0,05097	0,03877	0,04597
4: 9 % estiércol de lombriz	0,13790	0,36116	0,97717
5: 12 % estiércol de lombriz	0,02752	0,01782	0,12539

Tabla 4. Datos originales del Factor de Bioconcentración de cadmio en la parte aérea

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
1: 0 % estiércol de lombriz	0,00127	0,00118	0,00163
2: 3 % estiércol de lombriz	0,00335	0,00210	0,00408
3: 6 % estiércol de lombriz	0,00159	0,00121	0,00144
4: 9 % estiércol de lombriz	0,00431	0,01129	0,03056
5: 12 % estiércol de lombriz	0,00086	0,00056	0,00392

Tabla 5. Datos originales de la altura de planta

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
1: 0 % estiércol de lombriz	38,7	41,5	40,7
2: 3 % estiércol de lombriz	43,0	41,3	39,8
3: 6 % estiércol de lombriz	41,0	35,2	34,1
4: 9 % estiércol de lombriz	39,2	38,5	35,0
5: 12 % estiércol de lombriz	42,4	49,0	42,3

Tabla 6. Datos originales de longitud de raíz

Tratamientos	Repeticiones		
	I	II	III
1: 0 % estiércol de lombriz	23,80	23,00	19,40
2: 3 % estiércol de lombriz	18,70	14,40	18,60
3: 6 % estiércol de lombriz	20,20	21,70	15,40
4: 9 % estiércol de lombriz	17,70	15,40	14,50
5: 12 % estiércol de lombriz	23,80	23,00	21,70

ANEXO 4

Guía de clasificación para interpretación de análisis de suelos

1. Textura del suelo¹

Grupo Textural	Clase Textural
Gruesa	Arena Arena Franca
Moderadamente Gruesa	Franco Arenoso
Media	Franco Franco Limoso Limoso
Moderadamente Fina	Franco Arcilloso Franco Arcillo Limoso Franco Arcillo Arenoso
Fina	Arcillo Arenoso Arcillo Limoso Arcilloso

2. Reacción del suelo (pH)¹

Rangos	Clases
< 3,5	Ultra ácido
3,6 – 4,4	Extremadamente ácido
4,5 – 5,0	Muy fuertemente ácido
5,1 – 5,5	Fuertemente ácido
5,6 – 6,0	Moderadamente ácido
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido
6,6 – 7,3	Neutro
7,4 – 7,8	Ligeramente alcalino
7,9 – 8,4	Moderadamente alcalino
8,5 – 9,0	Fuertemente alcalino
> 9,0	Muy fuertemente alcalino

3. Salinidad y/o sodicidad¹

Símbolo	Descripción
0	<p>Libres a muy ligeramente afectados de exceso de sales y sodio</p> <p>Prácticamente ningún cultivo se encuentra inhibido en su crecimiento o muestra daños provocados por exceso de sales o sodio.</p> <p>Los suelos muestran conductividad eléctrica inferior a 4 dS/m. El porcentaje de sodio es menor del 4 %.</p>
1	<p>Ligeramente afectados por sales y sodio</p> <p>El crecimiento de las especies sensibles está inhibido, pero las plantas tolerantes pueden subsistir.</p> <p>La conductividad eléctrica varía de 4 a 8 dS/m. El porcentaje de sodio es de 4 a 8 %</p>
2	<p>Moderadamente afectados por sales y sodio</p> <p>El crecimiento de los cultivos está inhibido y muy pocas plantas pueden desarrollar adecuadamente.</p> <p>La conductividad eléctrica varía de 8 a 16 dS/m. El porcentaje de sodio está entre 8 y 15 %.</p>
3	<p>Fuertemente afectados por sales y sodio</p> <p>No se puede cultivar económicamente.</p> <p>La conductividad eléctrica es mayor de 16 dS/m. El porcentaje de sodio sobrepasa el 15 %.</p>

4. Materia orgánica¹

Nivel	Materia Orgánica (%)
Bajo	< 2
Medio	2 a 4
Alto	> 4

5. Fósforo Disponible¹

Nivel	P disponible (mg/kg)
Bajo	< 7
Medio	7 a 14
Alto	> 14

6. Potasio disponible¹

Nivel	K disponible (mg/kg)
Bajo	< 100
Medio	100 a 240
Alto	> 240

7. Carbonato de Calcio²

Nivel	CaCO ₃ (%)
Bajo	< 1
Medio	1 a 5
Alto	5 -15
Muy Alto	> 15

8. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)²

Nivel	CIC (cmol/kg)
Muy Baja	< 4
Moderadamente Baja	4 – 8
Baja	8 – 12
Moderadamente Alta	12 - 20
Alta	> 20

¹ MINAGRI-DGAAA. (2009). Reglamento de clasificación de tierras según su capacidad de uso mayor. Lima, Perú.

² Departamento de Suelos y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2002.

ANEXO 5

ANÁLISIS DE SUELOS (CARACTERIZACIÓN), ANÁLISIS DE MATERIA ORGÁNICA



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



Solicitante : SIDERLIN CAMILLA HINOSTROZA ZARATE

Departamento : JUNIN
 Distrito : EL MANTARO

Referencia : H.R. 55149-155C-16

Bolt: 13369

Provincia : JAUIJA
 Predio :
 Fecha : 12/08/16

Número de Muestra	Claves	pH (1:1)	C E (1:1) SSm	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables meq/100g					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ + H ⁺			
9368		6.19	0.53	0.00	2.65	33.9	107	33	34	33	Fr.Ar	17.60	10.80	2.28	2.40	0.25	0.00	15.74	15.74	89

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; F.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.A-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	
9368		31.98



Dr. Sady García Bendezú
 Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe



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



INFORME DE ANALISIS DE MATERIA ORGANICA

SOLICITANTE : SIDERLIN CAMILA HINOSTROZA ZARATE
PROCEDENCIA : JUNIN/JAUJUEL MANTARO
MUESTRA DE : HUMUS DE LOMBRIZ
REFERENCIA : H.R. 55150
BOLETA : 13368
FECHA : 11/08/16

N° LAB	CLAVES	pH	N %	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	C %
639		6.54	2.05	2.27	0.36	28.39

N° LAB	CLAVES	Cd ppm
639		1.29



Sady García Bendezu
Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

ANEXO 6

ANÁLISIS ESPECIAL EN FOLIAR RAÍCES Y PLANTAS



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : SIDERLIN CAMILA HINOSTROZA ZARATE
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ MANTARO
MUESTRA : PLANTA DE LUPINUS MUTABILIS
REFERENCIA : H.R. 59236
BOLETA : 472
FECHA : 11/07/2017

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
4130	Planta 1 - I	0.39
4131	Planta 1 - II	0.91
4132	Planta 1 - III	0.48
4133	Planta 2 - I	0.29
4134	Planta 2 - II	0.43
4135	Planta 2 - III	1.29
4136	Planta 3 - I	0.73
4137	Planta 3 - II	1.35
4138	Planta 3 - III	2.49
4139	Planta 4 - I	1.85
4140	Planta 4 - II	1.60
4141	Planta 4 - III	1.51
4142	Planta 5 - I	1.64
4143	Planta 5 - II	1.46
4144	Planta 5 - III	1.14



Dr. Sady García Bendejú
Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe



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



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : SIDERLIN CAMILA HINOSTROZA ZARATE
PROCEDENCIA : JUNIN/ JAUJA/ MANTARO
MUESTRA : RAICES DE LUPINUS MUTABILIS
REFERENCIA : H.R. 59235
BOLETA : 472
FECHA : 11/07/2017

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
4115	Raiz 1- I	1.30
4116	Raiz 1- II	1.21
4117	Raiz 1- III	1.67
4118	Raiz 2- I	3.43
4119	Raiz 2- II	2.15
4120	Raiz 2- III	4.17
4121	Raiz 3- I	1.63
4122	Raiz 3- II	12.39
4123	Raiz 3- III	1.47
4124	Raiz 4- I	4.41
4125	Raiz 4- II	11.55
4126	Raiz 4- III	31.25
4127	Raiz 5- I	0.88
4128	Raiz 5- II	0.57
4129	Raiz 5- III	4.01



Dr. Sady García Bendezi
Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

ANEXO 7

Panel fotográfico



FOTOGRAFÍA N° 1: Muestreo del Suelo



FOTOGRAFÍA N° 2: Muestra de suelo



FOTOGRAFIA N° 3: Vista del terreno para el muestreo



FOTOGRAFÍA N° 4: Trituración del suelo.



FOTOGRAFIA N° 5: Plantación de la planta *Lupinus Mutabilis*



FOTOGRAFÍA N° 6: Vista de los maceteros



FOTOGRAFÍA N° 7: Muestra para analizar en la UNALM



FOTOGRAFÍA N° 8: Muestra para analizar en la UNALM



FOTOGRAFÍA N° 9: Primera semana de plantación



FOTOGRAFÍA N° 10: Planta 1, 2, 3 en su última semana para la cosecha



FOTOGRAFÍA N° 11: Planta 4, 5, 6 en su última semana para la cosecha



FOTOGRAFÍA N° 12: Planta 7, 8, 9 en su última semana para la cosecha



FOTOGRAFÍA N° 13: Planta 10, 11, 12 en su última semana para la cosecha



FOTOGRAFÍA N° 14: Planta 13, 14, 15 en su última semana para la cosecha



FOTOGRAFÍA N° 15: Planta y raíz del macetero número 1



FOTOGRAFÍA N° 16: Planta y raíz del macetero número 2



FOTOGRAFÍA N° 17: Planta y raíz del macetero número 3



FOTOGRAFÍA N° 18: Planta y raíz del macetero número 4



FOTOGRAFÍA N° 19: Planta y raíz del macetero número 5



FOTOGRAFÍA N° 20: Planta y raíz del macetero número 6



FOTOGRAFÍA N° 21: Planta y raíz del macetero número 7



FOTOGRAFÍA N° 22: Planta y raíz del macetero número 8



FOTOGRAFÍA N° 23: Planta y raíz del macetero número 9



FOTOGRAFÍA N° 24: Planta y raíz del macetero número 10



FOTOGRAFÍA N° 25: Planta y raíz del macetero número 11



FOTOGRAFÍA N° 26: Planta y raíz del macetero número 12



FOTOGRAFÍA N° 27: Planta y raíz del macetero número 13



FOTOGRAFÍA N° 28: Planta y raíz del macetero número 14