



UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA
Y ARQUITECTURA**

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

T E S I S

CAPACIDAD FITORREMIADORA DE *Lupinus cuzcensis*

C.P. Sm (FABACEAE) EN SUELOS CONTAMINADOS

POR METALES PESADOS EN LA PUNA DEL

DEPARTAMENTO DE MOQUEGUA

PRESENTADA POR

BACHILLER SAN HIPÓLITO TICONA RAMOS

ASESOR:

DR. EDGAR VIRGILIO BEDOYA JUSTO

PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO AMBIENTAL

MOQUEGUA – PERÚ

2021

CONTENIDO

| | Pág. |
|------------------------------|-------------|
| Página de jurados..... | i |
| Dedicatoria | ii |
| Agradecimientos | iii |
| Contenido | iv |
| CONTENIDO DE TABLAS | ix |
| CONTENIDO DE FIGURAS | xii |
| CONTENIDO DE APÉNDICES | xiv |
| RESUMEN..... | xv |
| ABSTRACT | xvi |
| INTRODUCCIÓN | xvii |

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

| | |
|--|---|
| 1.1 Descripción de la realidad del problema..... | 1 |
| 1.2 Definición del problema | 4 |
| 1.2.1 Problema general..... | 4 |
| 1.2.2 Problemas específicos..... | 4 |
| 1.3 Objetivos de la investigación | 4 |
| 1.3.1 Objetivo general..... | 4 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 5 |
| 1.4 Justificación | 5 |
| 1.4.1 Social..... | 5 |
| 1.4.2 Económica..... | 5 |

| | |
|---|----|
| 1.4.3 Ambiental..... | 6 |
| 1.5 Alcances y limitaciones | 6 |
| 1.5.1 Alcances | 6 |
| 1.5.2 Limitaciones..... | 7 |
| 1.6 Variables | 7 |
| 1.6.1 Variable independiente (V.I) | 7 |
| 1.6.2 Variable dependiente (V.D) | 8 |
| 1.6.3 Variable interviniente..... | 8 |
| 1.6.4 Operacionalización de variables | 8 |
| 1.7 Hipótesis de la investigación..... | 10 |
| 1.7.1 Hipótesis general..... | 10 |
| 1.7.2 Hipótesis derivadas | 10 |

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

| | |
|---|----|
| 2.1 Antecedentes de la investigación | 11 |
| 2.1.1 Antecedentes regionales..... | 11 |
| 2.1.2 Antecedentes nacionales..... | 11 |
| 2.1.3 Antecedentes internacionales | 14 |
| 2.2 Bases teóricas | 16 |
| 2.2.1 Contaminación de suelos..... | 16 |
| 2.2.2 Causas del problema ambiental..... | 18 |
| 2.2.3 Estrategias para remediación los suelos con metales pesados | 19 |
| 2.2.4 Fitorremediación de suelos | 20 |

| | |
|---|----|
| 2.2.5 Técnicas de fitorremediación | 24 |
| 2.2.6 Métodos de la fitorremediación | 26 |
| 2.2.7 Ventajas y desventajas de la fitorremediación | 27 |
| 2.2.8 Plantas hiperacumuladora de metales pesados..... | 28 |
| 2.2.9 Vegetación de la puna | 29 |
| 2.2.10 Especie de planta botánica utilizada para fitorremediación | 30 |
| 2.3 Marco legal..... | 33 |
| 2.3.1 Protocolo de monitoreo de suelos | 35 |
| 2.3.2 Plan de muestreo para suelo | 35 |

CAPÍTULO III

MÉTODO

| | |
|---|----|
| 3.1 Tipo de la investigación | 37 |
| 3.2 Diseño de la investigación | 37 |
| 3.2.1 Características del diseño Factorial para la investigación..... | 38 |
| 3.3 Ubicación de la realización del experimento | 38 |
| 3.4 Diseño del invernadero o fito toldo..... | 39 |
| 3.5 Tratamiento experimental con la especie botánica <i>Lupinus cuzcensis</i> | 41 |
| 3.5.1 Técnicas de tratamiento..... | 41 |
| 3.6 Población y muestra | 47 |
| 3.6.1 Población..... | 47 |
| 3.6.2 Muestra..... | 48 |
| 3.7 Descripción de instrumentos para recolección de datos | 48 |
| 3.7.1 Técnica para la recolección de datos..... | 49 |

| | |
|--|----|
| 3.7.2 Instrumentos para recolección de datos | 49 |
| 3.8 Materiales y equipos | 49 |
| 3.9 Procesamiento y análisis de datos | 51 |
| 3.9.1 Procesamiento estadístico | 51 |
| 3.9.2 Análisis de datos de los resultados..... | 52 |

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

| | |
|---|----|
| 4.1. Presentación de resultados | 53 |
| 4.1.1 Resultados de la evaluación de la capacidad de propagación de la especie botánica <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm en el sistema de tratamiento..... | 53 |
| 4.1.2 Resultados de la capacidad de remoción de metales pesados, con la especie botánica <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm..... | 78 |
| 4.1.3 Resultados de la capacidad de acumulación de metales pesados en la especie botánica <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm..... | 85 |
| 4.2 Contratación de hipótesis | 92 |
| 4.2.1 Hipótesis general | 92 |
| 4.2.2 Hipótesis derivadas | 93 |
| 4.2.3 Hipótesis estadística..... | 93 |
| 4.3 Discusión de resultados..... | 94 |

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | |
|------------------------|----|
| 5.1 Conclusiones | 97 |
|------------------------|----|

| | |
|---|-----|
| 5.2 Recomendaciones..... | 98 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 100 |
| APÉNDICES..... | 110 |
| MATRIZ DE CONSISTENCIA..... | 132 |
| INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS..... | 135 |

CONTENIDO DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Componentes de las variables Independiente y dependiente | 9 |
| Tabla 2. Ventajas y desventajas de tecnologías de fitorremediación..... | 28 |
| Tabla 3. Estándares de Calidad Ambiental para Suelos en el Perú..... | 34 |
| Tabla 4. Tratamientos utilizados en el experimento | 38 |
| Tabla 5. Croquis experimental y aleatorización de tratamientos | 38 |
| Tabla 6. Temperatura media mensual y humedad relativa registradas en el invernadero | 41 |
| Tabla 7. Población de la especie <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm en el tratamiento .. | 48 |
| Tabla 8. Análisis de varianza | 52 |
| Tabla 9. ANVA para número de brotes a los 4 meses (unidad)..... | 53 |
| Tabla 10. Prueba de Tukey para número de brotes a los 4 meses(unidad) | 54 |
| Tabla 11. ANVA par número de brotes a los 8 meses (unidad) | 55 |
| Tabla 12. Prueba de Tukey para número de brotes a los 8 meses(unidad) | 56 |
| Tabla 13. ANVA para número de brotes a los 12 meses (unidad)..... | 57 |
| Tabla 14. Prueba de Tukey para número de brotes a los 12 meses (unidad) | 58 |
| Tabla 15. ANVA para altura de la planta a los 4 meses (cm)..... | 59 |
| Tabla 16. Prueba de Tukey para altura de la planta a los 4 meses (cm) | 60 |
| Tabla 17. ANVA para altura de la planta a los 8 meses (cm)..... | 61 |
| Tabla 18. Prueba de Tukey para altura de la planta a los 8 meses (cm) | 62 |
| Tabla 19. ANVA para altura de la planta a los 12 meses (cm)..... | 63 |
| Tabla 20. Prueba de Tukey para altura de la planta a los 12 meses (cm) | 64 |
| Tabla 21. ANVA para número de hojas a los 4 meses (unidad)..... | 66 |

| | |
|--|----|
| Tabla 22. Prueba de Tukey para número de hojas a los 4 meses (unidad) | 67 |
| Tabla 23. ANVA para número de hojas a los 8 meses (unidad) | 68 |
| Tabla 24. Prueba de Tukey para número de hojas a los 8 meses (unidad) | 69 |
| Tabla 25. ANVA para número de hojas a los 12 meses (unidad) | 70 |
| Tabla 26. Prueba de Tukey para número de hojas a los 12 meses (unidad) | 71 |
| Tabla 27. ANVA para prendimiento a los 4 meses (%)..... | 72 |
| Tabla 28. Prueba de Tukey para prendimiento a los 4 meses (%)..... | 73 |
| Tabla 29. ANVA para prendimiento a los 8 meses (%)..... | 74 |
| Tabla 30. Prueba de Tukey para prendimiento a los 8 meses (%)..... | 75 |
| Tabla 31. ANVA para prendimiento a los 12 meses (%)..... | 76 |
| Tabla 32. Prueba de Tukey para prendimiento a los 12 meses (%)..... | 77 |
| Tabla 33. Concentración de metales pesados en los tratamientos, antes y después de los 12 meses. | 79 |
| Tabla 34. ANVA para concentración de plomo total a los 12 meses del tratamiento..... | 79 |
| Tabla 35. Prueba de Tukey para de plomo total a los 12 meses del tratamiento .. | 80 |
| Tabla 36. ANVA para concentración de cadmio total a los 12 meses del tratamiento..... | 81 |
| Tabla 37. Prueba de Tukey para de cadmio total a los 12 meses del tratamiento. | 82 |
| Tabla 38. ANVA para concentración de cromo total a los 12 meses del tratamiento..... | 83 |
| Tabla 39. Prueba de Tukey para de cromo total a los 12 meses del tratamiento .. | 84 |
| Tabla 40. Concentración de metales pesado en la biomasa de la especie <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm..... | 86 |

| | |
|--|----|
| Tabla 41. ANVA para acumulación de plomo total en la biomasa de <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm..... | 86 |
| Tabla 42. Prueba de Tukey para acumulación de plomo total en la biomasa de <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm | 87 |
| Tabla 43. ANVA para acumulación de cadmio total en la biomasa de <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm..... | 88 |
| Tabla 44. Prueba de Tukey para acumulación de cadmio total en la biomasa de <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm..... | 89 |
| Tabla 45. ANVA para de la acumulación de cromo total en la biomasa de <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm..... | 90 |
| Tabla 46. Prueba de Tukey para acumulación de cromo total en la biomasa de <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm..... | 91 |

CONTENIDO DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Tipos de fitorremediación de los suelos | 22 |
| Figura 2. Vía de ingreso de los metales pesados en una planta a través de las vías exteriores | 23 |
| Figura 3. <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm. a 4300, Anexo Quelani, Moquegua, Perú. 31 | 31 |
| Figura 4. Diseño de la investigación | 46 |
| Figura 5. Media para número de brotes a los 4 meses de tratamiento | 55 |
| Figura 6. Media para número de brotes a los 8 meses de tratamiento. | 57 |
| Figura 7. Media para número de brotes a los 12 meses de tratamiento. | 59 |
| Figura 8. Media para altura de la planta a los 4 meses de tratamiento..... | 61 |
| Figura 9. Media para altura de la planta a los 8 meses de tratamiento. | 63 |
| Figura 10. Media para altura de la planta a los 12 meses de tratamiento. | 65 |
| Figura 11. Crecimiento en series de tiempo de <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm en los tratamientos. | 66 |
| Figura 12. Media para número de hojas a los 4 meses de tratamiento..... | 68 |
| Figura 13. Media para número de hojas a los 8 meses de tratamiento..... | 70 |
| Figura 14. Media para número de hojas a los 12 meses de tratamiento..... | 72 |
| Figura 15. Media para % prendimiento a los 4 meses de tratamiento | 74 |
| Figura 16. Media para % prendimiento a los 8 meses de tratamiento. | 76 |
| Figura 17. Media para % prendimiento a los 12 meses de tratamiento. | 78 |
| Figura 18. Media para de plomo total antes y después de 12 mese de tratamiento..... | 81 |

| | |
|--|----|
| Figura 19. Media para de cadmio total antes y después de 12 meses de tratamiento..... | 83 |
| Figura 20. Media para de cromo total antes y después de 12 meses del tratamiento..... | 85 |
| Figura 21. Media para acumulación de plomo a los 12 meses del tratamiento | 88 |
| Figura 22. Media para acumulación de cadmio a los 12 meses del tratamiento ... | 90 |
| Figura 23. Media para acumulación de cromo a los 12 meses del tratamiento | 92 |

CONTENIDO DE APÉNDICES

| | Pág. |
|--|-------------|
| Apéndice A. Panel Fotográfico..... | 110 |
| Apéndice B. Registro de datos de campo..... | 123 |
| Apéndice C. Mapas y plano de la ubicación del experimento..... | 126 |
| Apéndice D. Resultados de los análisis de laboratorio..... | 131 |

RESUMEN

Este trabajo de investigación denominado “Capacidad fitorremediadora de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm (Fabaceae) en suelos contaminados por metales pesados en la puna del departamento de Moquegua”, fue realizado en condiciones controladas (invernadero) en el distrito de Ichuña, Provincia General Sánchez Cerro, departamento de Moquegua, de enero 2020 a febrero 2021. Tuvo como objetivo evaluar la capacidad fitorremediadora de la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, a base de un sistema de tratamiento con la especie nativo de la zona. Se realizó un montaje on-site en macetas adicionado con suelo de relave minero, con diferentes concentraciones de Pb, Cd, y Cr para evaluar la capacidad de acumulación de estos metales pesados. El experimento fue realizado en sustratos preparados de 100% suelo control (S.C) cómo (T1), 20% relave minero (R.M) +80% suelos control (S.C) cómo (T2), y 50% suelo control (S.C) + 50% relave minero (R.M) cómo (T3), en un diseño experimental completamente al azar. El sistema de tratamiento presentó mayor eficiencia a los 12 meses; fue en el tratamiento T2 que en su efecto la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm se desarrolló mejor. Y para los de metales pesados en la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm las concentraciones máximas acumuladas de cada metal en los tratamientos fueron: 8,08 ppm de plomo en T1, 1,88 ppm de cromo en T2, y 1,04 ppm de cadmio en T3. Se puede concluir que la especie evaluado tienen una considerable acumulación de metales pesados y es una alternativa para remediar suelos contaminados.

Palabras clave: Fitorremediación, suelos contaminados, propagación, invernadero, metales pesados, *Lupinus*, hiperacumuladora.

ABSTRACT

This research work called “Phytoremediative capacity of *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm (Fabaceae) in soils contaminated by heavy metals in the highlands of the department of Moquegua”, was carried out under controlled conditions (greenhouse) in the district of Ichuña, Province General Sánche Cerro, department of Moquegua, from January 2020 to February 2021. It had as an objective to evaluate the phytoremediative capacity of the botanical species *Lupinus cuzcensis* CP Sm, based on a treatment system with the native species of the area. An on-site assembly was carried out in pots added with mining tailings soil, with different concentrations of Pb, Cd, and Cr to evaluate the accumulation capacity of these heavy metals. The experiment was carried out on substrates prepared from 100% control soil (SC) as (T1), 20% mining tailings (RM) +80% control soil (SC) as (T2), and 50% control soil (SC) + 50 % mining tailings (RM) how (T3), in a completely randomized experimental design. The treatment system presented greater efficiency at 12 months; it was in the T2 treatment that in its effect the species *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm developed better. And for those of heavy metals in the species *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm the maximum accumulated concentrations of each metal in the treatments were: 8,08 ppm of lead in T1, 1,88 ppm of chromium in T2, and 1,04 ppm of cadmium in T3. It can be concluded that the evaluated species has a considerable accumulation of heavy metals and is an alternative to remedy contaminated soils.

Keywords: Phytoremediation, contaminated soils, propagation, greenhouse, heavy metals, *Lupinus*, hyperaccumulator.

INTRODUCCIÓN

Los entornos característicos de la sociedad actual son la explotación creciente e indiscriminada de los recursos naturales y la producción masiva de diferentes desechos orgánicos e inorgánicos ocasionados por las actividades del hombre. Como resultado, se trae consigo daños irreversibles al medio ambiente, salud humana y la diversidad biológica existente en el planeta. A pesar de los avances continuos de la tecnología e investigaciones científicas, la problemática de la contaminación ambiental y el saneamiento en vastas regiones del mundo que persisten y se agrava continuamente, y los factores para este suceso son por las diferentes actividades que realiza el hombre; como la minería, el agro, la industria y otros. Esto sucede por el deficiente manejo de sus residuos que continúan produciéndose y que continúan con la contaminación del medio ambiente. Uno de los factores de estos problemas ambientales de mayor envergadura es la actividad de minera que incluyen los procesos de extracción mineral, los de beneficio de minerales (trituración, transporte, molienda, clasificación y concentración) y los de extracción metalúrgica. En estas operaciones también se producen gran cantidad de metales pesados e inclusive los residuos sólidos, líquidos y gaseosos que contaminan los suelos, agua y aire (Otones, 2014).

Los metales pesados se encuentran en el suelo como componentes naturales y también como consecuencia de las actividades antropogénicas. Entre los posibles impactos negativos y peligrosos que sufren los suelos se puede señalar a la contaminación por metales pesados que contienen los relaves mineros, por su lenta y difícil restauración en las capas del suelo. Los metales pesados más comunes en

un relave mineros son: el Cobre (Cu), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Cadmio (Cd), cromo (Cr) y otros elementos en menores concentraciones (Kossof et al., 2014).

Uno de los retos de la actualidad al que nos enfrentamos los profesionales de la rama de la Ingeniería Ambiental, es el hecho de encontrar el modo de recuperar el medio ambiente dañado, con el fin de que no sigan ocasionando problemas a la salud humana y la biodiversidad, así como plantear soluciones a los problemas ambientales. Se ha encontrado muchos métodos para esta causa y se ha desarrollado satisfactoriamente y también se viene investigando el tema, sin embargo, la mayoría de los métodos son de elevado costo y se requiere movilizar terrenos para ser tratado, así como uso de agentes químicos que pueden generar problemas posteriormente. Por este motivo se hace necesaria y urgente la búsqueda de nuevos métodos de remediación de suelos que sean accesibles y de menor costo posible.

Bajo este contexto, el tratamiento con la técnica de la Fitorremediación con especies botánicas aparece como un descubrimiento importante en el ámbito de la biotecnología, por consiguiente, es un tratamiento in situ para suelos contaminados que puede considerarse como una tecnología alternativa beneficiosa y sostenible (Robinson, 2006). En la fitorremediación se utilizan plantas con nombre de hiperacumuladores, estos tienen la capacidad de concentrar o retener los metales pesados en sus tejidos de superficie a niveles muy superiores al contenido en los suelos (Memon, 2001). Estas especies botánicas acumuladoras de metales pesados en la mayoría de los casos no se trata de especies extrañas o raras, sino de especies de plantas conocidas, y en algunos de los casos son especies endémicas capaces de absorber grandes cantidades de metales pesados depositados en el suelo, como el cadmio, zinc, cobre, selenio, plomo y otros elementos tóxicos (Mojiri, 2011).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción de la realidad del problema

Las actividades antropogénicas del hombre pueden ocasionar daños irreversibles al medio ambiente, salud humana y la diversidad biológica si no se toman precauciones necesarias. El Perú, al igual que otros países de Sudamérica, en las últimas décadas fue protagonista en los crecimientos de conflictos socio-ambientales, asociados principalmente a la expansión de las fronteras mineras. “De acuerdo a información obtenida por la Defensoría del Pueblo, la principal causa de estos conflictos en el Perú tiene su origen en los problemas ambientales. Varios de ellos están vinculados a la actividad de minería” (Capurro, 2011, p.110). Una de las características por las actividades de minería existe una creciente emisión y descarga de desechos al ambiente de sustancias contaminantes que provienen directamente de esta actividad. Estas sustancias contaminantes representan una amenaza seria para los seres vivos y la salud humana, por lo que se han desarrollado una serie y continua de métodos para enmendar los impactos ambientales negativos que existen en la actualidad (Delgadillo et al., 2011).

El departamento de Moquegua no ha sido ajeno a problemas ambientales. Además, de haber ocasionado múltiples movilizaciones sociales durante todo su ciclo de vida. Los casos que ha tenido el departamento de Moquegua y departamento vecino de Tacna es la Bahía de Ite ubicada en Tacna es una cuestión de contaminación ambiental y la presencia de metales pesados, por causa de la descarga de relaves de las mineras de Toquepala y Cuajone. Según Balvín el agua recuperada (30%) se vuelve a utilizar en el proceso de explotación del mineral, mientras que el agua con relave fue descargada directamente a la bahía de Ite (Balvín, 1995). Otros de los casos es el proyecto minero Quellaveco que se ubica en la cabecera de la cuenca del río Asana, y es uno de los principales afluentes del río Moquegua, independientemente de la realización de este proyecto, esta zona está percibida entre las zonas con disponibilidad crítica de agua hacia el año 2025 y además existe evidencias de contaminación en los suelos y agua por los antecedentes registrados como el de Southern Perú (Balvín, 2006).

Otro de los casos recientes es el de proyectos mineros de Aruntani SAC. La Inforegion indica. Según el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), el cuerpo de agua del río Coralaque son contaminados por filtraciones ácidas de los desmontes producidos por la unidad minera Tucari de la empresa Aruntani SAC. También se reportó que la situación se ha agravado debido a la temporada de las lluvias y que esto arrastra más desechos hasta los ríos donde se puede observar una coloración de naranja a marrón. Además, según los análisis se reportan el incremento de la concentración de metales pesados como el aluminio, plomo, arsénico, cadmio, níquel, zinc, en suelos y aguas superficiales y subterráneas (Inforegion, 2018).

Bajo este contexto, si bien se considera que las actividades de minería son de gran impacto económico y social, también existe evidencias de impactos negativos causados por sus actividades, como la contaminación ambiental y esto puede repercutir posteriormente en conflictos sociales. Se sabe que la minería es la actividad económica más significativa de un país. Sin embargo, también es responsable de daños ambientales, que reflejan la gran cantidad de residuos que genera la minera en sus operaciones, que a menudo no se tratan, y esto afecta directamente a la calidad del agua, suelos y aire (Feyen, 2015).

Sin embargo, para contrarrestar estos contaminantes de los suelos existen métodos para remediación; como los tratamientos convencionales que incluye excavación, rellenado de tierras, y uso de agentes químicos. Estas técnicas pueden ser más rápidas, pero también son inadecuadas para los suelos, y por ende esto se ha convertido en un problema más que generan los proyectos mineros. Los métodos convencionales para la reducción de la contaminación pueden ser costosos, perjudiciales y posteriormente estos puede afectar de manera irreversible las características de los suelos, y también puede perturbar significativamente a los seres vivos que en el habita (Padmavathiamma & Li, 2007).

Por lo expuesto, la remediación de los suelos se ha convertido en un asunto importante en la ciencia e Ingeniería Ambiental. Actualmente, a pesar de los avances tecnológicos e investigaciones, los problemas ambientales aún no tienen una solución concreta en el país, por tal motivo el presente trabajo de investigación se enfoca en la aplicación de un tratamiento con la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm de la región andina del departamento de Moquegua, esto con el objetivo de remediar suelos contaminados por los relaves mineros.

1.2 Definición del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál será la capacidad fitorremediadora de la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm en suelos contaminados por metales pesados en la puna del departamento de Moquegua?

1.2.2 Problemas específicos

¿Cuál será la capacidad de propagación de la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm en suelos contaminados con metales pesados?

¿Cuál será la capacidad de remoción de metales pesados, al término del sistema de tratamientos con la especie botánica de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm?

¿Cuál será la capacidad de acumulación de metales pesados de la especie botánica de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad fitorremediadora de la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm en suelos contaminados por metales pesados en la puna del departamento de Moquegua.

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar la capacidad de propagación de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm en suelos contaminados con metales pesados.

Evaluar la capacidad de remoción de metales pesados, al término del sistema de tratamientos con la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm.

Determinar la capacidad de acumulación de metales pesados en la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm.

1.4 Justificación

1.4.1 Social

La aplicación del tratamiento con especies botánicas, se reduciría la contaminación de los suelos, por la presencia de metales pesados provenientes de relaves mineros, y deterioro de los paisajes afectadas; situaciones que causan problemas ambientales y conflictos sociales.

1.4.2 Económica

Teniendo como ventaja, el reducido costo, la sencilla de la aplicación que se requiere y lo amigable que es con el medio ambiente, se busca determinar la capacidad de acumulación de los metales pesados, mediante tratamiento con especies botánicas de puna. De ser factible su aplicación, los tratamientos propuestos podrían ser implementados en suelos contaminados, lo cual sería económicamente más factible y viable para eliminar la presencia de metal pesados

de los suelos, y se dejaría de utilizar los tratamientos convencionales y costosos que existen.

1.4.3 Ambiental

La presente investigación permitirá determinar la factibilidad de la aplicación de tratamiento con especies botánicas de puna, en el tratamiento eficiente de los suelos con presencia de metales pesados provenientes de relaves mineros, para su posterior uso de los suelos y/o restauración del aspecto paisajístico; lo cual favorecería a reducir los problemas de contaminación de los suelos, cuerpo de agua, flora y fauna.

1.5 Alcances y limitaciones

1.5.1 Alcances

El alcance de la presente investigación permitirá contar con un estudio que muestra el proceso de técnica de la fitorremediación, la eficacia y las ventajas de un sistema de tratamiento a base de la especie botánica de puna *Lupinus cuzcensis* en el departamento de Moquegua (Alto tambo-Ichuña), en ambiente controlado (invernadero), y posteriormente se someterá a un análisis en un laboratorio para obtener los resultados pertinentes. Ello con la finalidad de eliminación de los metales pesados en los suelos in situ.

El resultado de la presente investigación servirá para plantear en el futuro, la aplicación de la fitorremediación para restaurar suelos contaminados por relaves mineros, contrarrestar o eliminación de los metales pesados en suelos del departamento de Moquegua. Así como para las mejoras de los proyectos de investigación que se ejecuten en el área de estudio del país.

Para la comunidad, este proyecto de investigación será de gran importancia, sabiendo que esta especie *Lupinus cuzcensis* es netamente de la zona, y tendrán mayor interés en la preservación de esta especie nativa, y lo más importante para la conservación de los suelos, así también contribuirá a una calidad de vida y sostenible.

1.5.2 Limitaciones

- Escasa información en el departamento de Moquegua sobre investigaciones de fitorremediación con especies botánicas de puna en suelos contaminados.
- Difícil acceso a la zona, por la geografía que cuenta el departamento, y lejanía para transportarse hasta el lugar del experimento.
- Difícil realización de muestreo de suelos y análisis físico químico de las plantas a evaluar, ya que Moquegua no cuenta con un laboratorio acreditado para el desarrollar investigaciones especializadas.
- La investigación requiere un tiempo determinado para el desarrollo del proceso de tratamiento con las especies de puna.

1.6 Variables

1.6.1 Variable independiente (V.I)

Suelos contaminados por metales pesados.

Indicadores:

a. Porcentaje de sustratos con relave minero:

- 0 % de suelo contaminado con relave minero (Suelo control)

- 20 % de suelo contaminado con relave minero
- 50 % Suelos contaminado con relave minero

1.6.2 Variable dependiente (V.D)

Capacidad fitorremediadora de especie *Lupinus cuzsensis* C.P. Sm.

Indicadores:

a. Capacidad de propagación:

- N° de brotes
- Altura
- N° de hojas
- % de prendimiento

b. Remoción de metales pesados del suelo:

- Cadmio (Cd)
- Plomo (Pb)
- Cromo (Cr)

c. Acumulación de metales pesados en la especie:

- En biomasa

1.6.3 Variable interviniente

Puna del departamento de Moquegua.

°C = Temperatura en el invernadero

% = Humedad relativa en el invernadero

1.6.4 Operacionalización de variables

La operacionalización de las variables se define en la siguiente tabla (ver tabla 1).

Tabla 1

Componentes de las variables Independiente y dependiente

| | Variables | Definición conceptual | Dimensión | Indicadores | Unidad | Instrumentos |
|----------------------|--|--|--|--|-----------------------------|--|
| Independiente | Suelos contaminados por metales pesados | El suelo es una capa superficial terrestre y esto puede ser contaminado por metales pesados provenientes de actividades antropogénicas y también naturalmente. Estos contaminantes contienen grandes cantidades de compuestos químicos y metales pesados como el arsénico, cromo, plomo, cadmio, selenio y entre otros elementos tóxicos para los suelos y la biodiversidad. | Porcentaje de sustratos con relave minero | 0 % de suelo contaminado con relave minero (Suelo control) | % | Ficha de registro |
| | | | | 20% de suelo contaminado con relave minero | % | |
| | | | | 50% Suelos contaminado con relave minero | % | |
| Dependiente | Capacidad fitorremediadora de especie <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm | La capacidad cumuladora de especies botánicas consiste en un tratamiento técnico donde se utiliza plantas vegetales para extraer metales pesados o eliminar contaminantes, desintoxicar y contener ambos contaminantes orgánicos e inorgánicos, especialmente de los suelos. | Capacidad de propagación de la especie | N° de brotes Altura N° de hojas % de prendimiento | Unidad Cm Unidad % | Ficha de registro |
| | | | Remoción de metales pesados del suelo | Plomo (Pb) Cadmio (Cd) Cromo (Cr) | ppm ppm ppm | Espectrofotómetro de Absorción Atómica |
| | | | Acumulación de metales pesados en la especie | En biomasa | ppm | Espectrofotómetro de Absorción Atómica |
| | | | | | | |

1.7 Hipótesis de la investigación

1.7.1 Hipótesis general

La especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm posee capacidad fitorremediadora en suelos contaminados por metales pesados en la puna del departamento de Moquegua.

1.7.2 Hipótesis derivadas

La especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm tiene capacidad de propagación en suelos contaminados por metales pesados.

La remoción de metales pesados, es considerablemente bueno al término del tratamiento de fitorremediación con la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm.

La especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm tiene capacidad de acumulación de metales pesados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes regionales

El presente trabajo de investigación no cuenta con antecedentes a nivel de la Región Moquegua.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Jara et al. (2014) menciona en su artículo titulada: “Capacidad fitorremediadora de cinco especies alto andinas de suelos contaminados con metales pesados” los tratamientos con especies botánicas, fue realizado en condiciones de invernadero en el distrito de Lachaqui, provincia de Canta, departamento de Lima, de octubre 2011 a octubre 2012. Donde fueron evaluados veinte tratamientos con un diseño factorial completo 5 x 4: 5 especies de puna, y 4 sustratos con 30 %, 60 %, 100 % de relave de mina (RM) y suelo sin RM. La producción de biomasa redujo significativamente en *Solanum nitidum*, *Brassica rapa*, *Fuertesimalva echinata* y *Urtica urens* y *Lupinus ballianus*, con el tratamiento de 100% de relave de mina.

Los resultados obtenidos fueron; 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⁻¹ MS y 1024,2 mg de zinc kg⁻¹ MS. En las raíces de *L. ballianus* fue obtenida la más alta acumulación de cadmio, con una concentración de 287,3 mg kg⁻¹ MS con el tratamiento de 100 % de relave de mina. *Fuertesimalva echinata* presentó el mayor índice de tolerancia (IT) al tratamiento de 100% de relave de mina, con un IT de 41,5 %, pero, *S. nitidum* y *L. ballianus* presentaron el mayor IT al tratamiento de 60 % de relave de mina con IT de 68,5 % y 67,9.

Suaña (2017) menciona en su tesis titulada: “Capacidad del girasol (*Helianthus annus l.*) para absorber cadmio de suelos contaminados en ambiente controlado-Puno” la investigación se desarrolló en la ciudad de Puno- Perú, entre el mes de noviembre del 2015 hasta noviembre del 2016. En su investigación indica la capacidad del girasol para absorber y acumular metales pesados de los suelos, y contaminados por la actividad minera, uno de ellos es el cadmio. Como el objetivo del estudio fue determinar la concentración de cadmio en suelos contaminados procedentes del centro poblado La Rinconada Puno y determinar la capacidad de absorción de cadmio por el girasol (*Helianthus annus L.*) de la raíz, tallo y hoja, y esto se realizó en un ambiente controlado(vernadero), a sí mismo fue comparado con el ambiente del exterior, considerando como factor principal la organografía de la especie vegetal (raíz, tallo y hojas), en dos bloques del ambientes de cultivo utilizando 20 maceteros, 10 macetas de girasol con sustrato en el interior del invernadero y 10 con sustrato a la intemperie, el análisis de contenido de cadmio tanto en tejidos vegetales como en suelo se realizó por el método de absorción

atómica, el diseño experimental que se utilizó fue bloque completo al azar. Los resultados de la investigación fueron: La concentración promedio de cadmio en el suelo del invernadero presentó un valor promedio de 24,36 mg/kg, en la intemperie se determinó 21,76 mg/kg, no existiendo diferencia estadística entre ambos ambientes de cultivo ($p=0,112$). En los órganos de la especie vegetal, la concentración de cadmio ambiente exterior se obtuvo en hoja una media de 0,21 mg/kg, en raíz 0,88 y tallo 0,29 en ambiente interior hoja 0,29 mg/kg, raíz con 1,80 y tallo 0,27, siendo estadísticamente superior el contenido en la raíz ($p<0,05$). La raíz de plantas de girasol presenta una media de absorción de cadmio de 5,716 %, tallo con 1,217 % y hojas 0,529 % de absorción; encontrando mayor absorción del cadmio, se produce a nivel radicular de la especie girasol.

Jara (2018) menciona en su tesis titulada “Evaluación de *Lupinus condensiflorus* C.P.Sm., *L. ballianus* C.P. Sm. y *Astragalus garbancillo* Cav. (Fabaceae) en la restauración de suelos que contienen plomo, cadmio y zinc”. En su investigación demuestra los objetivos de conocer la viabilidad de las semillas, y evaluar el desarrollo de *Lupinus ballianus*, *L. condensiflorus* y *Astragalus garbancillo* en suelos contaminados con cadmio, plomo y zinc y el uso potencial de estas especies en la fitorrestauración de suelos contaminados con metales pesados. El trabajo de investigación fue realizado en el invernadero en Lachaqui, Canta, región Lima, y en el Laboratorio de Fitología Aplicada en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, en el año 2018. La prueba emergencia de las plántulas fue realizada en un sustrato preparado en un diseño experimental completamente al azar. El desarrollo de las tres especies vegetales fue evaluado con 12 tratamientos de relave de mina, y la unidad experimental fue una maceta de 19

cm de diámetro y 5 kg de capacidad. El experimento se realizó mediante el diseño experimental factorial completo de 3 x 4, y la distribución de las unidades experimentales de los tratamientos se realizó al azar, con 5 repeticiones por cada tratamiento. La acumulación de cadmio, plomo y zinc en los tejidos de las plantas se determinó mediante el método de absorción atómica. Los resultados de la investigación fueron: Las semillas con escarificación mecánica de lijado de la testa e inducidas en oscuridad, permitió una alta germinación de *Lupinus ballianus* L. *condensiflorus* y *Astragalus garbancillo*. Por lo tanto, las semillas escarificadas favorecieron la emergencia de plántulas en el sustrato, y la mayor emergencia de plántulas se obtuvo en *Astragalus garbancillo*. El mayor contenido de humedad en las semillas fue registrado en *Astragalus garbancillo*. La longitud de planta, el número de hojas y la producción de biomasa en las tres especies disminuyeron significativamente con el tratamiento de 100% de relave de mina. Los mayores valores de acumulación de cadmio total, plomo total, zinc total; y el contenido de estos metales en las raíces de *Lupinus ballianus*, *L. condensiflorus* y en *Astragalus garbancillo*, fueron obtenidos con el tratamiento de 100% de relave de mina. El factor de bioconcentración de cadmio en las tres especies fue > 1 . Pero, el factor de bioconcentración y de transferencia de plomo y zinc en las tres especies fue < 1 , en conclusión, las tres especies son fitoestabilizadores de metales pesados.

2.1.3 Antecedentes internacionales

Dary et al. (2010) menciona en su artículo titulada: “Fitoestabilización "in situ" de suelos contaminados con metales pesados utilizando *Lupinus luteus* inoculado con rizobacterias promotoras del crecimiento de plantas resistentes a los metales”.

La potencial de fitoestabilización del *Lupinus luteus* inoculado en metales con *Bradyrhizobium sp. 750* y PGPR resistentes a los metales pesados (rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas), para la recuperación in situ de suelos contaminados con diferentes metales pesados desechados por la minería. *Lupinos amarillos* acumulados metales pesados principalmente en las raíces (Cu, Cd y especialmente Pb se trasladaron más a los brotes). Esto indica que es potencial de uso de la planta para la técnica de fitoestabilización de metales. Además, indica que la acumulación de As era indetectable en la investigación. Por otro lado, la acumulación de zinc fue 10-100 veces más alta que todos los demás metales, tanto en raíces como en brotes. Inoculación con *Bradyrhizobium sp. 750* aumentó tanto el contenido de biomasa como el de nitrógeno, lo que esa fijación de nitrógeno fue efectiva en suelos con niveles moderados de contaminación. Co-inoculación de altramuces con un consorcio de PGPR resistente a metales (que incluye *Bradyrhizobium sp.*, *Pseudomonas sp.* *Ochrobactrum cytisi*) produjo una mejora adicional de la biomasa de la planta. Al mismo tiempo, se observó una disminución en la acumulación de metales pesados, tanto en brotes y raíces, lo que podría deberse a un efecto protector ejercido en la rizosfera de la planta. En los resultados indican la utilidad de *Lupinus luteus* inoculado con una bacteria consorcio de PGPR resistentes a metales pesados como un método para la recuperación in situ de suelos contaminados con metales tóxicos.

Díaz y Sierra (2017) menciona en su artículo titulada: “Fitorremediación con artemisia *Absinthium* y *Lupinus pubescens benth.* Como alternativa para la descontaminación de ecosistemas andinos y altoandinos amenazados por metales pesados”. En esta investigación realizada en un área del municipio de Guachetá-

Cundinamarca, donde predominan los bosques Andino y Altoandino, y desarrollado en la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería Maestría en Ciencias Ambientales, en el año 2017. Se evaluó la viabilidad de fitorremediar concentraciones de plomo, cadmio y mercurio en zonas aledañas a minas de carbón mediante el uso de *Artemisia absinthium* y *Lupinus pubescens Benth*, especies de estos ecosistemas. Se realizó un montaje on-site en materas adicionando diferentes concentraciones de Cd, Hg y Pb para evaluar la capacidad de acumulación de cada uno de los metales y en coexistencia con otros. Indica que la especie de plantas vegetales se cultivaron durante 158 días y se realizó toma de muestras a los 60, 102 y 158 días. Como resultado del estudio, se determinó que durante los primeros 60 días las plantas acumularon un mayor porcentaje de metales y en las muestras colectadas a los 102 días, se encontró que para *Lupinus pubescens Benth* las concentraciones máximas acumuladas de cada metal fueron: 2015,5 mg/kg de cadmio, 72,2 mg/kg de plomo, y 0,16 mg/kg de mercurio, mientras que para *Artemisia absinthium* fueron: 13024,9 mg/kg de cadmio, 98,7 mg/kg de plomo y 0,12 mg/kg de mercurio. En la investigación concluye que las especies evaluadas tienen un alto potencial de fitoacumulación de metales pesados y considera que son una alternativa para la descontaminación de ecosistemas estratégicos.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Contaminación de suelos

La contaminación de suelos puede definirse a la introducción de sustancias peligrosas en la superficie de los suelos y que está conformado o definido como un

ente tridimensional vivo compuesto de biomoléculas inorgánicos como minerales, agua y aire, que contempla una fracción orgánica, además de micro y macro fauna encargados de la degradación de los componentes existentes en los suelos. En condiciones normalmente los suelos se encuentran en equilibrio a razón de orden geológico y forma química muy insoluble y por lo tanto no puede representan un problema ambiental. Los compuestos orgánicas e inorgánicas, como los metales pesados a esto se podrían considerar peligrosos, sólo cuando estas sustancias alcanzan grandes niveles y pueden ponen en riesgo la salud del hombre y el de los ecosistemas, a esto se define contaminación de suelo. No obstante, como consecuencia de las diversas actividades del hombre, principalmente de las actividades industriales, a raíz de esta situación ha cambiado drásticamente los problemas de contaminación de suelos. Se ha acumulado en los suelos diferentes compuestos en grandes cantidades y/o forma soluble rompiendo el equilibrio natural de los suelos, y esto ha causado la contaminación de los cuerpos de agua y los suelos, ya que estos elementos tóxicos se van introduciéndose en la red trópica y esto representa un problema ambiental serio que requiere ser tratada antes que cause graves problemas de contaminación de los suelos (Bautista, 1999).

Muchas de las sustancias peligrosas como los metales pesados y/o sustancias toxicas son considerados contaminantes ambientales y estos se pueden encontrar en la superficie de los suelos y también en cuerpo de agua. Sin embargo, muchas son de carácter natural y también tienen fuentes principales como las de actividades antropogénicas; las industrias de minería, las actividades agrícolas, fabricas industriales, explotaciones petroleras, y actividades de construcción, e

inclusive las actividades en las ciudades a través del mal manejo de los residuos sólidos y aguas residuales domésticos, y otras actividades similares que posteriormente terminan contaminando las capas superficiales y el entorno subterráneo del planeta (Maqueda, 2003).

2.2.2 Causas del problema ambiental

Las causas de los problemas ambientales están ligada directamente a procesos de explotación de las actividades de la minería. Considerando que la actividad minera es una significativa fuente de elementos tóxicos para suelos, la red trófica, y la salud humana. Esto repercute principalmente, por que las actividades incluyen los procesos de extracción mineral, los beneficios de minerales consisten (trituration, molienda, clasificación y concentración) y los de extracción metalúrgica. Todos estos procesos se sitúan directamente en las explotaciones de mineras, mientras que la extracción metalúrgica solo en fechas establecidas según los criterios del proyecto minero. En estas operaciones de la minería se producen gran cantidad de residuos líquidos, sólidos, y gaseosos que pueden terminar contaminando los suelos y la atmosfera. Así mismo, las partículas minerales desparramadas en los suelos sufren un proceso natural de oxidación y proceso de meteorización que esto darán lugar a una liberación de elementos tóxicos, influyendo a estos elementos se encuentren en formas más móviles y biodisponibles en el cuerpo de los suelos (Alloway, 1995). En las actividades de minería también se depositan residuos sólidos y líquidos que estos contienen gran cantidad de metales pesados y estos se convierten en toxico para la superficie de los suelos, y del entorno minero, originando la contaminación y representando un problema ambiental de gran

preocupación considerando su peligrosidad para la salud humana y los ecosistemas existentes (Alkorta et al., 2010).

La contaminación ambiental a causa de las actividades de minería puede ocasionar efectos negativos muy variados, ya sea sobre los organismos, o sobre los ecosistemas y el equilibrio ambiental (efectos eco tóxicos). Asimismo, puede causar efectos negativos de tipo estético de los paisajes de la superficie, y efectos negativos sociales, económico y político a los que no se les da la debida atención y que esto ha llegado ocasionar graves problemas socio ambientales. Por lo habitual, los efectos por este acontecimiento ocurren en lugares cercanos o aledaños al origen del contaminante existente, en cuyo caso se conocen como efectos en micro y macro ambientales, como los daños a la biodiversidad y a la salud de las poblaciones humanas en zonas específicas, a causa de los contaminantes que se generan en ella. Dicho esto, se podría considerar factible establecer una cuantificación entre los niveles de contaminación y resultados concretos en relación a la salud humana como el aumento de la mortalidad en la zona donde se sospecha existencia de contaminación por metales tóxicos que pueden ser procedentes de las actividades mineras. Este dato resulta muy útil para comprender la estadística en materia de salud si se reduce o aumenta la contaminación en dichos lugares afectados y específicos (Díaz et al., 2011).

2.2.3 Estrategias para remediación los suelos con metales pesados

Existen diferentes técnicas de remediaciones como fisicoquímicas y biológicas que han sido utilizadas para la eliminación de metales pesados de los suelos y el agua, y lo que aún se considera un reto desafiante en relación con el costo y la complejidad

de las técnicas e inviabilidad para remediación de suelos contaminados por metales tóxicos (Barceló & Poschenrieder, 2003).

- **Remediación fisicoquímica de suelos.** -El tratamiento fisicoquímico incluye excavación, relleno de tierras, tratamiento térmico, lixiviación y electrorecuperación. Estas técnicas son rápidas pero inadecuadas, costosas y causan efectos adversos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y causan contaminaciones secundarias en la posterioridad (Glick, 2010). El enfoque fisicoquímico solo modifica el problema de la contaminación a otro problema posterior, y no remedian completamente los suelos contaminados que se pudiera esperar a cambio (Lambert, 2000).

- **Remediación biológica de suelos.** - La remediación biológica se considera el método más efectivo de eliminación de metales pesados y tóxicos, porque es un proceso natural, amigable con el medio ambiente, y a su vez el tratamiento es de bajo costo, mayor aceptación pública y factible para realizarla (Doble & Kumar, 2005). Así mismo, la introducción de las especies botánicas en algunos casos son especies consideradas nativas y los microorganismos para eliminar contaminantes tóxicos del medio ambiente, esto se conoce como remediación biológica amigable para el medio ambiente (Singh et al., 2009).

2.2.4 Fitorremediación de suelos

Dary menciona que la fitorremediación es un tratamiento técnico donde se utiliza plantas botánicas para eliminar contaminantes de los suelos, y su función de las plantas es de desintoxicar y contener ambos contaminantes orgánicos e inorgánicos,

especialmente de los suelos. También se considera que es potencialmente eficiente, económico y ambientalmente es una estrategia para recuperación ecológica del entorno terrestre (Dary et al., 2010).

Wang define que la fitorremediación, se puede considerar apropiado y rentable en suelos in situ, es considerado como el método de remediación más satisfactorio mediante la aplicación de especies de plantas vegetales tolerantes a metales pesados. Es particularmente efectivo en el manejo de relaves mineros de grandes áreas con contaminación superficial de componentes orgánicos, nutrientes y metales pesados ionizados (Wang et al., 2017).

En conclusión, las plantas botánicas llamados hiperacumuladoras de metales pesados tratan la corteza de las tierras contaminadas sin destruir la capa superior de los suelos, conservando o mejorando la utilidad y la fertilidad de la superficie de los suelos (Hazrat & Sajad, 2013). La fitorremediación es una técnica considerablemente prometedora para el saneamiento ambiental, y restauración de suelos con concentraciones de metales pesados y peligrosos, tóxicos, que pueden ser provenientes de las actividades antropogénicas como los proyectos mineros, procesos industriales y otras actividades similares (Marrero et al., 2012).

El interés del uso de la técnica de fitorremediación es por los prometedores resultados de los estudios que causaron gran interés en encontrar nuevas especies de plantas botánicas que sean tolerantes a los metales pesados, y la búsqueda de métodos de biorremediación más efectivos para tratamiento de los suelos contaminados por metales pesados. Esto se considera un enfoque a modos de restaurar suelos contaminados, y también buscar nuevas tecnologías adecuados, de

menor costo posible y viable para realizar esta tarea. Por consiguiente, las especies de plantas acumuladoras juegan un papel importante en la eliminación de contaminantes como son los metales pesados de los suelos. En la (Figura 1), se muestra tipos de fitorremediación donde se puede observar las tres técnicas propias de fitorremediación y también se muestran las partes de una planta botánica: Fitoextracción - Fitoestabilización -Fitovolatilización (Marques et al., 2009).

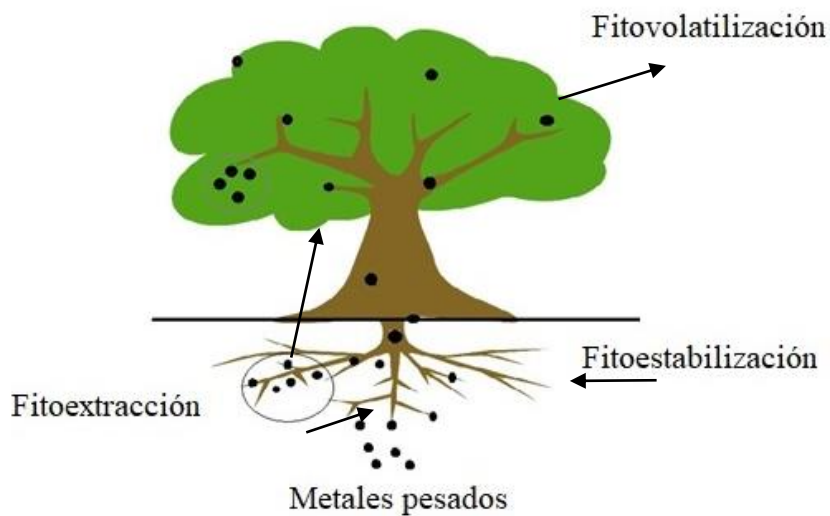


Figura 1. Tipos de fitorremediación de los suelos

Fuente: Wang et al., 2017.

- La función de los transportadores de las plantas en la absorción de metales pesados. Para transportar el agua y los nutrientes sustanciales de las raíces al tallo y hasta las hojas, las plantas utilizan un mecanismo que incluye el sistema de conductores que comprende el tejido vascular, mismo que contiene diversos grupos de células especializadas como son la xilema y el floema. Estas células están formadas por paredes y redes de células, traqueidas y tubos cribosos, que unidas transportan el agua, incluyendo los metales tóxicos (Audesirk et al., 2008).

- El agua y los iones metálicos que son tomados por la raíz, son transportados primero por la xilema a las diferentes partes de una planta (Figura 2). Este transporte, permite el libre movimiento de los disolventes y de los metales pesados a través de conductos porosos. La tras locación del metal de la raíz a las hojas se da mediante transportadores que los llevan desde la parte del simplasto de las raíces hasta los espacios intercelulares (apoplasto) de la xilema de las plantas botánicas hiperacumuladoras (Sheoran et al., 2011).

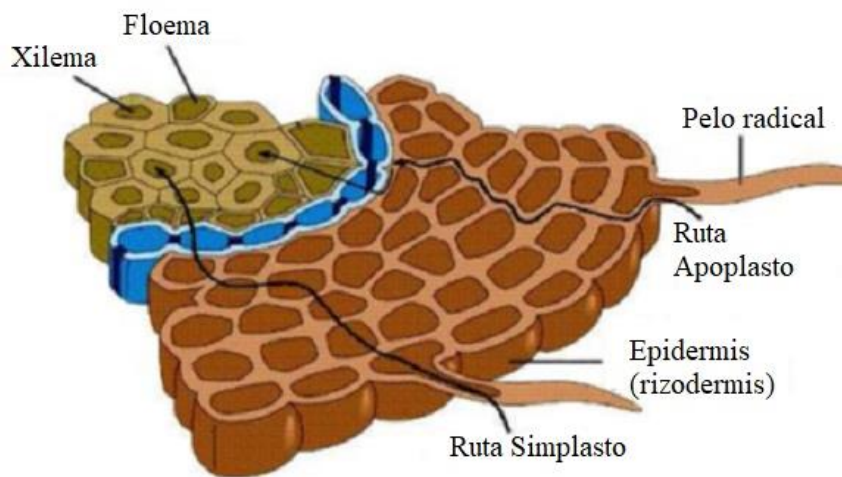


Figura 2. Vía de ingreso de los metales pesados en una planta a través de las vías exteriores (apoplasto) o interior (simplasto) a las células de una raíz.

Fuente: Moore et al., 1997.

- **Distribución y retención de iones metálicos en una especie hiperacumuladora.** – En las plantas, si una vez que los metales pesados han sido transportados a las células de las hojas, estos son acumulados en locaciones de la célula de una planta botánica, tales como la epidermis, los mesófilos, paredes celulares y vacuolas de una planta, siendo estos sitios donde los metales pesados no logre poner en riesgo los procesos continuos de las células de una planta botánica. Por ejemplo, la acumulación de metales en la vacuola de la planta disminuye las

interacciones entre los procesos metabólicos y los metales pesados, mientras tanto en la localización de estos elementos en el tejido de la epidermis tiene un impacto menor y relevante en tejidos más activos metabólicamente, como los mesófilos (Sheoran et al., 2011). Las vacuolas de las plantas botánicas son componentes transcendentales en la acumulación de los iones metálicos, donde frecuentemente son sustancia que forma complejos con iones de metales pesados (quelados), ya sea por ácidos orgánicos o fitoquelatinas (FC) y metalotioneínas (MT). Estos últimos, son péptidos y proteínas ricas en cisteína que retienen metales pesados. Las metalotioneínas específicamente, son compuestos de bajo peso molecular y contienen alrededor de 60 a 80 residuos de aminoácidos de los cuales entre 9 y 16 unidades son de cisteína, mismos que son genéticamente codificado por una planta botánica. Por otro parte, las fitoquelatinas principalmente están compuestas de tres aminoácidos (glutamato, cisteína y glicina), que a diferencia de las metalotioneínas no son codificadas directamente por los genes de las plantas botánica (Ghosh & Singh, 2005).

2.2.5 Técnicas de fitorremediación

Las técnicas de fitorremediación pueden incluir conocidos como la fitoextracción (o fitoacumulación), fitoestabilización, fitovolatilización, y que estos son considerados técnicas apropiados para tratamiento de suelos contaminados por metales pesados (Alkorta et al., 2004).

- **Fitoextracción de metales pesados.** -La Fitoextracción se refiere principalmente a la depuración de metales pesados de los suelos mediante la absorción por las plantas acumuladoras. Esta tecnología se basa en la capacidad de

las raíces de las plantas botánicas para absorber, retener los metales pesados de los suelos y de transporte a los tejidos vegetales. El proceso de concentración da un resultado de una reducción de la masa contaminada del suelo y también en la transferencia del metal de una matriz basada en silicato de aluminio (Suelo) a una matriz basada en carbono (Planta). El carbono en el material de la planta se puede oxidar a dióxido de carbono, disminuyendo aún más (y concentrado) la masa de material a tratar y depurar o reciclar (Blaylock & Huang, 1999).

- **Fitoestabilización de metales pesados.** -Una alternativa para reducir el riesgo ambiental por suelos contaminados con metales pesados pueden ser el uso de plantas para estabilizar la superficie de los suelos, reduciendo así la erosión y la lixiviación a las capas más profundas de los suelos. Esta opción se llama Fitoestabilización y considera el uso de plantas tolerantes a metales pesados para inmovilizar en el subterráneo, disminuyendo al metal movilidad y reducir la posibilidad de que integren en la cadena alimenticio (Wong, 2003). Las plantas desempeñan un papel fundamental en la Fitoestabilización, no solo protegiendo la superficie del suelo por contacto específico como el humano y el impacto de las lluvias fuertes, pero también estabiliza físicamente el suelo con sistema de raíces fuertes para prevenir la erosión, las raíces de las plantas también ayudan a disminuir la filtración de agua a través del suelo, reduciendo aún más la infiltración de los contaminantes (Laperche et al., 1997).

- **Fitovolatilizacio de metales pesados.** -Según la conversión química de elementos tóxicos en compuestos menos tóxicos y volátiles es una estrategia viable para la desintoxicación de contaminantes de iones metálicos, los que resulta en la

depuración de elementos volátiles peligrosos y específicos del ambiente (por ejemplo, mercurio -Hg y selenio -Se) de follajes del suelo y la plantas a la atmosfera (Raskin et al.,1997). Sin embargo, la viabilidad de utilizar plantas capaces de volatilizar metales pesados para la remediación ambiental se considera discutible, por su complejidad que esto representa a la hora de remediar pertinentemente los suelos. Si un compuesto toxico volátil es expuesto a la atmosfera por las plantas durante el tratamiento de la fitorremediación, el destino del gas en la atmosfera debe evaluarse como parte del riesgo ambiental latente por su magnitud de peligrosidad que presenta estos elementos tóxicos e invisibles para el ojo humano (Pilon, 2005).

2.2.6 Métodos de la fitorremediación

Aunque se han llevado a cabos distintas técnicas para mitigar la descarga de metales pesados en los suelos, ellos no son suficientes para eliminar la contaminación de los diversos ecosistemas, la contaminación por metales pesados puede ser remediada por técnicas químicas, físicas y biológicas. Éstos pueden constituir en dos categorías conocidas como:

- **El método Ex-situ**, esto requiere del levantamiento del suelo contaminado por metales pesados para el tratamiento posterior, y posteriormente devolviendo el suelo remediado al lugar de origen o área de estudio. Para los métodos ex-situ convencionales se requiere de excavaciones de áreas específicas, detoxificación y/o destrucción del contaminante o los contaminantes físicamente o químicamente y como resultado de este tipo de tratamientos, los contaminantes sufren la estabilización, la solidificación, inmovilización, incineración o destrucción definitiva.

- **El método In-situ**, está dada principalmente por la remediación de los suelos en el sitio específico, sin la excavación de suelos contaminado, es decir sin modificar el lugar, es este caso las tecnologías requeridas para la remediación de suelos o el agua, destrucción o transformación de los contaminantes son la inmovilización parcial o definitiva esto para reducir el biodisponibilidad y separación del contaminante del suelo contaminado por metales pesados. Las técnicas In-situ son más favorables y convenientes que las técnicas ex-situ debido a su bajo costo que se requiere en la aplicación y al impacto mínimo en el ecosistema del área afectado, sea de los suelos o aguas e inclusive los entornos subterráneos (Sepulveda et al., 2005).

2.2.7 Ventajas y desventajas de la fitorremediación

La técnica de la fitorremediación tiene muchas ventajas y también desventajas que se requiere analizar antes de realizar un tratamiento en un área afectada por contaminantes, sobre todo al ser comparada con otras técnicas convencionales. Así mismo, tiene limitaciones y que esto pone un freno para que ser aplicada en todos los casos de la remediación que se deseen realizar. Cada una de estas desventajas y ventajas deben de ser evaluada meticulosamente cada vez que se desee poner en práctica la técnica de fitorremediación, ya que el resultado óptimo del tratamiento dependerá principalmente de los aspectos propios de la técnica y como la selección de las especies botánicas, y el tipo de suelo que se requiere tratar y los contaminantes que se desea evaluar, esto considerado todo los aspectos inaplazables e importantes. Las ventajas y desventajas de la técnica de fitorremediación se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2*Ventajas y desventajas de tecnologías de fitorremediación*

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| 1. Remediable para variedad considerable de compuestos, tanto orgánicos como para inorgánicos. | 1. Restringida para sitios con contaminación superficial por la movilidad de estos compuestos. |
| 2. Aplicable en sustratos sólidos y líquidos, y de forma <i>in-situ</i> y <i>ex-situ</i> . | 2. Su aplicación puede requerir de mucho tiempo o hasta años. |
| 3. Su aplicación <i>in-situ</i> ejerce un impacto mínimo sobre los suelos | 3. Restringida a sitios con una concentración baja en contaminantes. |
| 4. Reduce la cantidad de desechos al ser vertidos en más de un 95%, y esto puede ser utilizado como bio-mineral. | 4. Restringida por condiciones climáticas de las plantas utilizadas para su aplicación. |
| 5. No requiere de equipo caro o de personal altamente especializado. | 5. Requiere de una disposición apropiada de las plantas o biomasa. |
| 6. Su aplicación es amigable con el medio ambiente y de bajo costo para tratamientos. | 6. Pueden afectar la biodiversidad si se introducen especies no nativas o endémicas en la zona. |
| 7. Aplicaciones <i>in-situ</i> disminuyen la expansión de los contaminantes en la vía aérea o por el agua. | 7. El consumo de los productos de estas vegetales contaminadas es causa de preocupación (Ingesta de frutos). |

Fuente: Ghosh & Singh, 2005.

2.2.8 Plantas hiperacumuladora de metales pesados

Especie de plantas botánicas consideradas hiperacumuladora de metales pesados, que puede alcanzan a crecer y desarrollarse en suelos con altas concentraciones de metales pesados que son considerados tóxicos y estas plantas pertenecen a una diversidad de flora especializada en tolerar los metales pesados, y que logran colonizar suelos originarios de serpentina o ultramáficos ricos en Ni y calamina (mineral de concentraciones de Zn y Cd), estos pueden ser naturales o contaminación antrópica ocasionadas. Estas plantas acumuladoras son seleccionadas naturalmente por su tolerancia a un determinado metal pesado (Diez, 2008). Considerando las condiciones propias que favorecen el proceso, la

hiperacumulación de metales pesados se puede ver de dos formas definidas: natural e inducida. Esto se basa en la hiperacumulación, donde las plantas tienen la capacidad de convertir en soluble los metales pesados y absorberlos de los suelos mediante actividad de sus raíces, para luego trasladarlos a los tallos y posteriormente a las hojas, donde se almacenan grandes cantidades de metales pesados (Sheoran et al., 2011).

Las raíces de las plantas botánicas juegan un papel fundamental en la hiperacumulación natural, ya que son particularmente desarrolladas para extraer elementos que pueden ser tóxicos o nutrientes esenciales de los suelos, y a su vez las raíces cuentan con enormes áreas superficiales (pelos radicales) con las que puede cubrir una gran parte del terreno. Las plantas acumuladoras a través de las raíces separan los compuestos metálicos, como los ácidos mugiénico y avénico, los cuáles actúan especialmente como quelantes metálicos especializados llamados sideróforos (compuestos que facilitan la absorción del hierro) y también pueden extraer otros metales pesados (Lasat, 2000).

2.2.9 Vegetación de la puna

En la cordillera de los andes los ecosistemas están situados por encima de los 3300 m.s.n.m, donde se forman las cabeceras de las cuencas de Vertiente Oriental y Occidental de los Andes, aquí los ecosistemas son de gran interés donde podemos toparnos con praderas de pastizales, pedazos de bosques, matorrales y bofedales como características propias del territorio andino (Young et al. 1997).

En el norte del departamento de Moquegua (al sur de Perú) la vegetación de la puna está directamente influenciado por la época de lluvias (diciembre a abril) y

la flora generalmente se caracteriza por arbustos, pajonales, hierbas anuales y helechos y flora estacional. La mayoría de la vegetación en la puna del Perú son pastoreadas y son comestibles para ganado de los habitantes que existen (Wilcox et al. 1988). La puna es relativamente pobre en especies, la vegetación de comunidades alpinas es de gran interés como está se adapta a ambientes extremos de temperatura de la zona (Nowak et al. 2014).

2.2.10 Especie de planta botánica utilizada para fitorremediación

Existen diferentes especies botánicas en las que se ha identificado una potencial para realizar la técnica de fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados. Estas especies botánicas se encuentran en muchas familias y géneros, así como también, algunas otras especies corresponden a modificaciones genéticas que se han utilizados para adaptarlas a la fitorremediación de ciertos contaminantes específicos como Cadmio, Plomo, Zinc, selenio y entre otros elementos que existe en los suelos (Delgadillo et al., 2011).

A continuación, en el siguiente ítem definimos la taxonomía y las características de la especie botánica con las que se experimentó en la investigación, incluyendo la imagen de la especie botánica seleccionada que se utilizó en el presente trabajo de investigación:

2.2.10.1 Taxonomía de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm.

a. Taxonomía.

Tropicos.org, (s.f) menciona que la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm tiene la siguiente clasificación:

Orden: Fabales Bromhead

Familia: Fabaceae Lindl

Género: *Lupinus L.*

Especie: *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm

L. cuzcensis por Smith, Charles Piper (1941).



Figura 3. *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm. a 4300, Anexo Quelani, Moquegua, Perú.

2.2.10.2 Descripción botánica del Género *Lupinus L.*

Son especies científicamente llamados *Lupinus L.*, estas especies son de plantas dicotiledóneas anuales o perennes, herbáceas a leñosas con hojas de forma digitada, habitualmente compuesta por ocho-doce folíolos que varían entre ovalados a puntiagudos en los bordes. El color de las hojas puede variar de amarillo a verdoso y plomo claro al igual que los tallos. Las semillas son de forma aplanada u ovalada

dependiendo de la especie y otras pequeñas, rugosas y de color café. Las inflorescencias son muy vistosas y llamativas, de colores variados. “Inflorescencia racimosa, con flores alternas, semiverticiladas y verticiladas. Flores zigomorfas y papilionácea; cáliz, profundamente bilabiado, 2-3 dentados; corola con alas, quilla y estandarte de colores e intensidades distintas, generalmente amarillo, azul, purpura rara vez blanco” (Lezama 2010, p. 36-37).

2.2.10.3 Endemismo de la especie *Lupinus L.*

La especie *Lupinus* es el género con gran cantidad de especies endémicas siendo al mismo el que tiene mayor importancia de estudios taxonómicos y mayor recolección en datos encontrados. La familia Fabaceae endémicas ocupan la gran parte de las regiones mesoandina, puna húmeda y seca y bosques húmedos, entre los 1100 y 4800 msnm que habita estas especies (Baldeón et al., 2006).

2.2.10.4 Fenología y ciclo de vida de la especie *Lupinus cuzcensis* en la puna del departamento de Moquegua.

Esta especie botánica *Lupinus cuzcensis* es un “Subarbusto de densas inflorescencias amarillas. Habita pajonales andinos 4450 m. Sura-Yunga, Distrito de Yunga” (Montesinos 2012, p. 314). La fenología de la especie *Lupinus cuzcensis* en el departamento de Moquegua está ligada directamente a la temperatura y a las estaciones propias de la zona andina, es por eso que está considerado planta estacional en esta parte del Perú. Se considera que esta especie generalmente se desarrolla en épocas lluviosas y puede logra el máximo crecimiento o desarrollo según las condiciones propios de la zona altoandina. Las raíces de esta especie

pueden ser anuales o perennes, y por ende en las épocas lluviosas pueden volver a brotar y desarrollarse con gran facilidad y así cumple su ciclo de vida.

2.3 Marco legal

En la parte normativa, para el presente trabajo de investigación, tomamos la referencia de las normativas vigentes que existen en el país, y también se consideramos las pautas necesarias y las técnicas propios que la normar exige, esto para remediación de suelos contaminados por metales pesados. Bajo este contexto, señalamos las normas e interpretamos.

Según el artículo 31° de la Ley N° 28611, ley general del medio ambiente dentro de la política nacional del ambiente define los principios y establece para evaluar la calidad de suelos, en suelo agrícola, suelo residencial, suelo industrial, y suelo comercial, y se toma medida que establece los niveles máximos permisibles y de concentraciones o del grado de elementos, sustancias que pudieran alterar la calidad del cuerpo receptor de los suelos.

Según D.S. N° 011-2017-MINAM donde se aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo, específica y establecen el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el suelo en su condición de cuerpo receptor (ver la tabla 3), muestra los valores determinados de estándares nacionales de calidad ambiental para cuerpo receptor suelos considerado en el Perú, esto para tener en cuenta los criterios técnicos en la realización de los análisis en el laboratorio y posteriormente para la evaluación de los resultados.

Tabla 3*Estándares de Calidad Ambiental para Suelos en el Perú*

| Estándares de Calidad Ambiental para Suelos | | | | |
|--|------------------------|----------------|-------------------------------|---|
| N° | Parámetros Inorgánicos | Uso del suelo | | |
| | | Suelo Agrícola | Suelo Residencial/ Parques | Suelo Comercial/ Industrial/ Extractivos |
| 1 | Cianuro libre | 0,9 | 0,9 | 8 |
| 2 | Arsénico total | 50 | 50 | 140 |
| 3 | Bario total | 750 | 500 | 2 000 |
| 4 | Cadmio total | 1,4 | 10 | 22 |
| 5 | Cromo total | ** | 400 | 1 000 |
| 6 | Cromo VI | 0,4 | 0,4 | 1,4 |
| 7 | Mercurio total | 6,6 | 6,6 | 24 |
| 8 | Plomo total | 70 | 140 | 800 |

Fuente: Ministerio del Ambiente, 2017.

Según D. S. N° 012-2017-MINAM donde se aprueban criterios para la gestión de sitios contaminados y en el artículo 13 de la normativa indica la medida de remediación para el plan dirigido a la remediación puede comprender medidas de remediación, cuyo objetivo es eliminar o reducir, a niveles aceptables, los riesgos a la salud humana y el ambiente concernientes a la contaminación del sitio:

- Las medidas de descontaminación que tengan por objetivo eliminar o reducir los contaminantes del sitio hasta alcanzar los valores establecidos de los ECA para suelos, los niveles de fondo o los niveles establecidos en el estudio de evaluación de riesgos a la salud y el ambiente (ERSA) o estándares internacionales.

- Las medidas de aseguramiento para evitar la dispersión de los contaminantes o disminuir la exposición de los receptores, a niveles que no impliquen riesgos para la salud y el ambiente. Este tipo de medidas deben establecerse considerando su eficacia a largo plazo.

2.3.1 Protocolo de monitoreo de suelos

Según el D. S. N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo, la Guía para Muestreo de Suelos establece especificaciones para: i) determinar la existencia de contaminación en el suelo, ii) determinar la dimensión (extensión horizontal y vertical) de la contaminación, iii) determinar las concentraciones de nivel de fondo, y/o iv) determinar si las acciones de remediación lograron reducir la concentración de los contaminantes en el suelo, de acuerdo a las metas planteadas. En función al objetivo del muestreo de suelos, la Guía establece los siguientes tipos: muestreo de identificación, muestreo de detalle, muestreo de nivel fondo, y muestreo de comprobación de la remediación. En la Guía se especifica, además, diferentes técnicas de muestreo, criterios para la determinación del número de muestras, así como medidas de calidad para la toma y el manejo de las muestras.

2.3.2 Plan de muestreo para suelo

Según el D. S. N° 002-2013-MINAM, para la realización de cualquier tipo de muestreo, preliminarmente se debe elaborar un plan de muestreo que sujete la información y programación relacionada con los objetivos del muestreo. Para el plan del muestreo de suelos, es necesario precisar claramente los objetivos que

permitan un óptimo proceso de levantamiento de la información necesaria para la descripción de la superficie, definiendo: i) el área en la que se focalizarán los muestreos, ii) objetivos del plan de muestro, iii) los tipos de muestreo según los objetivos específicos, vi) la determinación de la densidad, y enfoque de puntos de muestreo, v) los procedimientos de campo, vi) los métodos de conservación de muestras, y vii) las necesidades analíticas a desarrollarse.

El plan de muestreo de suelos, debe contener los siguientes aspectos:

- Información primordial del suelo (potencialmente) contaminado, comprendiendo los mapas de ubicación.
- La estrategia y procedimiento de toma de muestras a realizar. Tipo y el método.
- Determinación de los parámetros a analizar en las muestras.
- Las técnicas, el equipo y los instrumentos a emplearse en el muestreo, que aseguren la homogeneidad y representatividad de las muestras.
- Tipo y características de la preservación y conservación de las muestras a emplearse durante el transporte de las mismas al laboratorio y medidas a adoptar para el manejo de las muestras.

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1 Tipo de la investigación

Investigación es de tipo experimental, ya que existe el manejo de variables bajo condiciones controladas y que se interesa en la aplicación de conocimientos para remediar in situ suelos contaminados por metales pesados provenientes de relaves de mina, eliminando los contaminantes o haciéndolos inocuos.

3.2 Diseño de la investigación

En el presente trabajo de investigación se utilizó el diseño experimental completamente al azar (DCA), con una especie de planta botánica de la puna del departamento de Moquegua, 3 tratamientos contenidos de sustratos con de relave de mina 20 %, 50 % y suelo control, en un ambiente controlado (invernadero). Para el tratamiento se realizó 2 repeticiones para la especie botánica (ver tabla 4), y un análisis antes y después del tratamiento para cada uno de los sustratos (Suelos). También se utilizó el análisis estadístico análisis de varianza (ANOVA), para la comparación de los promedios tanto para la especie botánica y suelos, se manejó la prueba de Tukey y en ambos casos se utilizó un error $\alpha=0,05$.

3.2.1 Características del diseño Factorial para la investigación

El diseño factorial para estudiar en la presente investigación fueron:

Tabla 4

Tratamientos utilizados en el experimento

| Tratamiento con la especie <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm | Determinación | Valor | |
|---|---------------|-------|----|
| | | R1 | R2 |
| T1 - 0 % de suelos contaminado con relave minero + 100 % de suelo control | - Plomo (Pb) | ppm | |
| | - Cadmio (Cd) | ppm | |
| | - Cromo (Cr) | ppm | |
| T2 - 20 % de suelos contaminado con relave minero + 80 % de suelo control | - Plomo (Pb) | ppm | |
| | - Cadmio (Cd) | ppm | |
| | - Cromo (Cr) | ppm | |
| T3 - 50 % de suelos contaminado con relave minero + 50 % de suelo control | - Plomo (Pb) | ppm | |
| | - Cadmio (Cd) | ppm | |
| | - Cromo (Cr) | ppm | |

a. Croquis del experimento.

El croquis para aleatorización de tratamientos fue de la siguiente manera:

Tabla 5

Croquis experimental y aleatorización de tratamientos

| Tratamientos | Repeticiones | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| T1 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 2 |
| T2 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 | 210 | 2 |
| T3 | 301 | 302 | 303 | 304 | 305 | 306 | 307 | 308 | 309 | 310 | 2 |

Nota: Los números corresponde a las muestras al azar para cada tratamiento.

3.3 Ubicación de la realización del experimento

Las pruebas experimentales y el tratamiento correspondiente del presente trabajo de investigación se realizaron en el distrito de Ichuña (Alto tambo) del

departamento de Moquegua Perú, y el lugar específico está a una distancia aproximado de 112 km en línea recta desde la ciudad de Moquegua hasta llegar al sector de Umalaya. Donde se acondicionó apropiadamente el fitotoldo o invernadero para crecimiento y desarrollo de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm.

La ubicación se encuentra con las Coordenadas siguientes:

Coordenadas UTM: Norte: 8197466,61. Este: 346700,75.

Altitud: 4248 msnm.

Mapa de la ubicación del proyecto, ver anexo.

3.4 Diseño del invernadero o fito toldo

Un invernadero o Fito toldo es una construcción cuya cubierta puede ser de madera o adobe, y el techo es de un material que deja pasar la luz solar con facilidad y acumula el calor durante el día y desprende lentamente durante la noche, cuando la temperatura baja. El fitotoldo permite controlar el ambiente interno, modificando el clima y creando condiciones apropiadas para el desarrollo de las especies botánico específicos o seleccionados para propios de una investigación (FAO, 2012). Bajo este contexto, se consideró la construcción de un fitotoldo con materiales de adobe para la pared y el techo con plástico Agrofilm de 250 micras apropiados para un invernadero, esto para garantizar el crecimiento y desarrollo de la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm.

a. Ubicación del invernadero

La ubicación del fitotoldo o invernadero se muestra con los siguientes datos:

Distancia: 112,73 km en línea recta desde la ciudad de Moquegua hasta llegar al sector de Umalaya del distrito de Ichuña.

Coordenadas UTM: Norte: 8197466,61. Este: 346700,75.

Altitud: 4248 msnm.

b. Dimensiones del invernadero

El acondicionamiento del invernadero estuvo construido para la ocasión con las siguientes dimensiones para la presente investigación:

- Largo: 10,00 m

- Ancho: 5,00 m

- Altura: 1,50 m

Área Total: 50,00 m²

Plano esquemático del invernadero y distribución de las muestras, ver anexo.

c. Datos meteorológicos en el invernadero durante el experimento.

La temperatura media mensual y humedad relativa registradas en el invernadero, en el distrito de Ichuña, provincia de Sánchez Cerro, departamento de Moquegua. La toma de la lectura estuvo registrada en cada mes, en horario de 7 am y 3 pm durante el tiempo del experimento. En la tabla 6 muestra los datos meteorológicos registrados durante la etapa del experimento desde el 01 de enero del 2020 al 30 de Diciembre del 2020, donde se observa que la temperatura elevada registrada se evidencio durante el mes de diciembre con un promedio de 22,1 °C , en relación a la temperatura mínima se registró en la primera semana de abril con 7,2 °C, sin embargo la máxima temperatura promedio se registró en el mes de Enero 2020 con 25,7 °C respectivamente, en lo relacionado a la humedad relativa máxima se registró en el mes de marzo 51 % y finalmente la humedad relativa mínima se registró en el mes de agosto y septiembre del 2020 con 23 % respectivamente.

Considerando la temperatura en el exterior, la máxima temperatura en los meses de abril, mayo, y junio estuvo a 10 °C bajo 0 en la noche, y de día estuvo en un promedio de 5,2 °C respectivamente.

Tabla 6

Temperatura media mensual y humedad relativa registradas en el invernadero

| Meses | Temperatura media mensual | | | Humedad Relativa media mensual | | |
|------------|---------------------------|------|-------|--------------------------------|-----|-------|
| | (°C) | | | (%) | | |
| | Max | Min | Prom. | Max | Min | Prom. |
| Enero | 27,2 | 24,2 | 25,7 | 48 | 42 | 45 |
| Febrero | 26,9 | 20,5 | 23,7 | 52 | 40 | 46 |
| Marzo | 15,2 | 7,4 | 11,3 | 57 | 45 | 51 |
| Abril | 10,2 | 4,2 | 7,2 | 30 | 22 | 26 |
| Mayo | 20,2 | 7,4 | 13,8 | 37 | 25 | 31 |
| Junio | 18,4 | 7,2 | 12,8 | 30 | 26 | 28 |
| Julio | 16,4 | 10,8 | 13,6 | 27 | 21 | 24 |
| Agosto | 26,9 | 10,5 | 18,7 | 27 | 19 | 23 |
| Septiembre | 23,9 | 10,5 | 17,2 | 27 | 19 | 23 |
| Octubre | 19,8 | 10,6 | 15,2 | 30 | 26 | 28 |
| Noviembre | 26,2 | 19,2 | 22,7 | 28 | 24 | 26 |
| Diciembre | 27,8 | 16,4 | 22,1 | 30 | 24 | 27 |

3.5 Tratamiento experimental con la especie botánica *Lupinus cuzcensis*

3.5.1 Técnicas de tratamiento

Las técnicas utilizadas en el presente trabajo de investigación tienen el siguiente proceso diseñado según las condiciones propias del experimento:

a. *Colecta de las semillas.*

La colecta de semillas de las especies *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm fueron seleccionadas y colectadas apropiadamente en el distrito de Ichuña del

departamento de Moquegua, Anexo Jachuota, sector Quelani. En el siguiente párrafo mencionamos los datos exacta de la ubicación, donde suelen crecer y desarrollarse esta especie de plantas vegetal:

Coordenadas UTM: Norte: 8197099,11. Este: 349686,84.

Altitud: 4507 msnm.

Mapa de la ubicación de colecta de semillas, ver anexo.

3.5.1.1 Propagación de la especie *Lupinus cuzcensis*.

Para capacidad de propagación de la especie *Lupinus cuzcensis* se acondicionó un fitotoldo que cumplan los requerimientos pertinentes para crecimiento y desarrollo de la especie botánica de puna y posteriormente se utilizó la especie vegetal para el tratamiento de suelos contaminados por metales pesados. En el invernadero se observó la evolución del crecimiento de la especie de puna; posteriormente se midió la altura de la planta, número de brotes, número de hojas y el % prendimiento. Esta actividad se realizó y se registró cada 4 meses hasta el término del tratamiento.

- Características de las variables en la evolución de la especie botánica

a. Porcentaje de prendimiento (%).

Después del sembrío de la especie, la evaluación del porcentaje de prendimiento se realizó cada 4 meses hasta el término del tratamiento, por conteo simple y luego se demostró en porcentaje las plantas vivas a la conclusión, utilizando la siguiente fórmula.

$$\%P = \frac{NPV}{NPT} \times 100$$

%P = Porcentaje de prendimiento

NPV= Número de plantas vivas

NPT= Número de plantas totales

b. Altura de la especie Lupinus cuzcensis C.P. Sm (cm).

La altura de la especie se evaluó cada 4 meses hasta el término del tratamiento, la medida fue tomada desde la superficie del sustrato hasta al ápice del tallo con la ayuda de una regla. Para esta variable se hizo la medida del incremento de altura de los esquejes.

c. Número de hojas (unidad).

El registro sobre el número de hojas se realizó mediante un conteo simple en el tallo principal y de los brotes, el cual, en intervalos de 4 meses, hasta la culminación del experimento.

d. Número de brotes (unidad).

Para la evaluación del número de brotes se recabo datos intervalos de 4 meses después del sembrío, mediante un conteo simple.

3.5.1.2 Tratamiento de suelo con relave de mina.

El tratamiento consistió en una preparación previo de un sustrato entre relave de mina (Sedimento) y suelo control (S.C). Para determinar la concentración de metales pesados en los sustratos se analizó un antes y después de 12 meses en función a la fenología de la especie.

a. Suelo contaminado.

El suelo contaminado para el experimento fue obtenido del relave de mina polimetálica de Toquepala, sector Quebrada onda, la ubicación esta con las coordenadas siguientes:

Coordenadas UTM: Norte: 8070108,00. Este: 304420,00.

Altitud: 1207 msnm.

Las muestras se levantaron de tipo de muestreo simple a 10 cm de profundidad para sedimentos, según la referencia de la guía para muestreo de suelo del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM.

Mapa de la ubicación de levantamiento de muestra suelo contaminado, ver anexo.

b. Suelo control.

La muestra de suelo fue levantada en el sector de Umalaya del distrito de Ichuña. Que está a 112,73 km en línea recta desde la ciudad de Moquegua hasta llegar a la ubicación.

Coordenadas UTM: Norte: 8197461,19. Este: 346716,04.

Altitud: 4248 msnm.

El suelo control fue obtenida de un suelo pastizal, y fue levantado en tipo de muestreo simple a 30 cm de profundidad, según la referencia de la guía para muestreo de suelo del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM y luego se prepararon los sustratos para el experimento, y se envió las muestras al laboratorio para determinación de las características físico químicas.

Mapa de la ubicación de levantamiento de muestra suelo control, ver anexo.

3.5.1.3 Preparación de área del ensayo.

La preparación del área destinado para el experimento, se realizó mediante una limpieza del ambiente en forma manual, luego se eliminaron toda clase de malezas y se retiraron todo tipo de residuos y material ajeno al experimento, pedazos de madera, clavos, piedras, etc.

3.5.1.4 Preparación de los sustratos para el tratamiento.

El sustrato se conformó de suelo pastizal con apariencia agrícola (S.C), y suelo contaminado (Sedimento de relave de mina). Seguidamente se procedió a tamizar con una zaranda para quitar piedras y materia orgánica. Luego se procedió el pesado del porcentaje de suelos contaminado y suelo control, a cada uno de los sustratos empleados según las técnicas propios de la investigación. El pesado se realizó con una balanza digital, para la cantidad de 10 macetas por tratamiento, con un peso de 4 kilos de sustrato por maceta, y 40 kilos por tratamiento.

3.5.1.5 Sembrío de las semillas de *Lupinus cuzcensis*.

El sembrío se realizó a condición de los 3 tratamientos para la presente investigación, se consideró 5 semillas por maceta que mide 22 cm de diámetro, y 25 cm de altura. También se consideró la selección de las semillas de calidad antes del sembrío, esto con el objetivo de obtener un resultado óptimo para la presente investigación.

3.5.1.6 Análisis de las muestras en el laboratorio.

Al término del tratamiento a los 12 meses, las muestras fueron enviados a un laboratorio que cumplía la garantía y confiabilidad, como requisitos que cumplía fue los equipos propios para determinar la concentración de metales pesados en una especie vegetal y para suelos, y también se consideró la metodología. Así mismo se consideró las condiciones adecuadas para el traslado de las muestras al laboratorio y criterios técnicos para obtener un resultado verídico. Bajo este contexto, se eligió al laboratorio de Agua, Suelos y Medio ambiente de la Universidad Nacional Agraria la Molina de la ciudad de Lima.

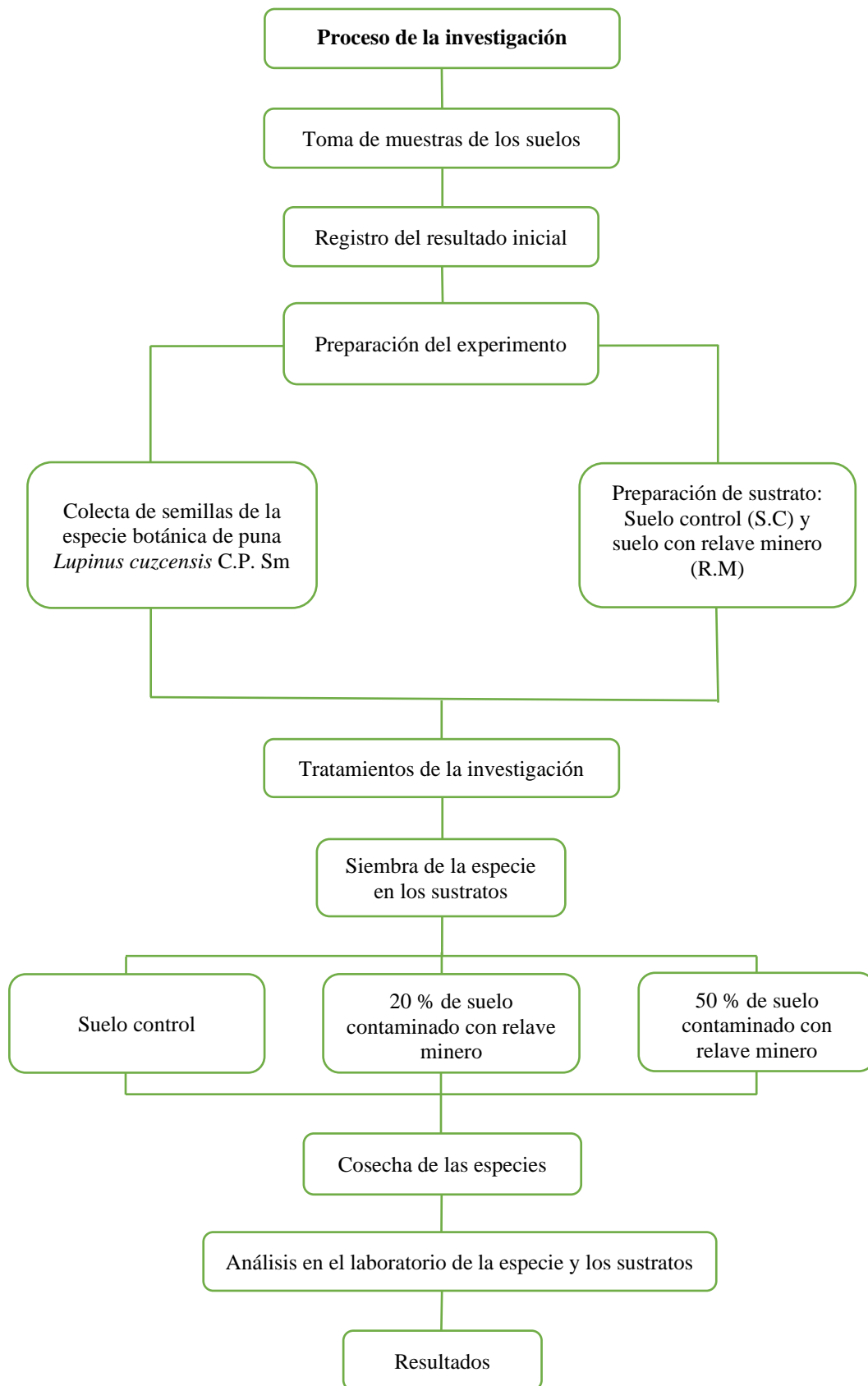


Figura 4. Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación se basa en una secuencia de pasos que se tienen en cuenta al realizar los 3 tratamientos para remediación de suelos contaminados, empezando por la toma de muestra de suelo control (S.C), suelo con relave minero (R.M) y un análisis en laboratorio, esto para utilizar como línea de base y registro de los resultados iniciales para el experimento. Posteriormente se consideró la preparación del experimento, donde consideramos la colecta de las semillas de las dos especies botánicas *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm y luego se preparó los tratamientos con sustratos de una mezcla homogénea entre suelo control y suelos de relave de mina; esto consistía de 20 % y 50 % relave de mina (R.M) y suelo control (S.C). Posteriormente se sembró las semillas en unas macetas que contenían sustratos. Así mismo se realizó los tres tratamientos sometiéndolos a pruebas en el sustrato a un promedio de 12 meses en condición controlado (invernadero). Para finalizar el experimento se cosechó las especies botánicas y luego se envió para analizar en el laboratorio, y al mismo modo se levantó las muestras de los tratamientos de suelos y se envió al laboratorio y se registró los resultados finales de los tratamientos.

3.6 Población y muestra

3.6.1 Población

La población estuvo conformada por suelos pastizal de la zona (suelo control) y sedimento de relave minero, la población se complementó con plántulas de la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm de la puna del departamento de Moquegua, y se conformó el tratamiento de la siguiente manera propios de la investigación:

Tabla 7

Población de la especie Lupinus cuzcensis C.P. Sm en los tratamientos

| Tratamientos | Población |
|---|---------------------------|
| Tratamiento con 100 % suelo control (S.C) | 50 unidades de plántulas |
| Tratamiento con 20 % de relave de mina +80 % suelo control | 50 unidades de plántulas |
| Tratamiento con 50 % de relave de mina + 50 % suelo control | 50 unidades de plántulas |
| Número total de la población | 150 unidades de plántulas |

3.6.2 Muestra

La muestra estuvo conformada por la cantidad de sustratos de 40 kg aproximado para 50 plántulas en una superficie de 0,5m². Para la población de especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, el tamaño de muestra estuvo conformado por 50 plántulas distribuidos en macetas con sustrato y con una prueba de 3 tratamientos.

3.6.2.1 Sub muestra.

Para suelos la muestra se envió al laboratorio un aproximado de 1kg suelo en forma aleatoria un antes y después de 12 meses. Y para las especies *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm 250 gramos, cuyos tratamientos estuvo conformados por 25 unidades experimentales distribuidas y en forma aleatoria para el laboratorio.

3.7 Descripción de instrumentos para recolección de datos

En el presente trabajo de investigación se aplicó técnicas e instrumentos de recolección de datos basados en técnicas reconocidas en el ámbito de las investigaciones cuantitativas y al mismo modo se aplicó instrumentos metódicos para validar la investigación planteada.

3.7.1 Técnica para la recolección de datos

- **Observación directa:** Se hizo para el caso de observaciones en el campo y donde se realizó la recolección de los datos como la propagación y crecimiento de la especie botánica, también se tiene en cuenta la coleta de las plantas para su posterior traslado al laboratorio.

- **Observación indirecta:** Se hizo para el caso de observaciones mediante laboratorio para el análisis.

3.7.2 Instrumentos para recolección de datos

- Ficha de registro de temperatura y humedad relativa (ver apéndice).

- Ficha de registro resultados de tejido foliar y suelos (ver apéndice).

- Ficha de registro de la capacidad de propagación de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. (ver apéndice).

- Croquis DCA experimental para tejido foliar y suelos

- Estándares de calidad ambiental para suelos

- Cadena de custodia para tejido vegetal y suelos

3.8 Materiales y equipos

Los materiales y equipos utilizados en la presente investigación serán de materiales de plástico, y equipos precisión, los cuales se especifica a continuación:

a. Materiales en el campo

- Bolsas herméticas

- Guantes quirúrgicos

- sobre manila
- Regla metálica
- Cooler para levantar las muestras
- Plástico Agrofilm de 250 micras
- Maceta plástica de 22 cm de diámetro
- Cuaderno de campo
- Software informático: Google Earth
- Cinta métrica
- Clavos
- Alambre
- Panel informativo

b. Equipos en el laboratorio

- Espectrofotómetro de Absorción Atómica
- Digestor de calor
- Balanza analítica
- Estufa digital

c. Equipos en el campo

- GPS
- Higrotermógrafo digital
- Balanza digital
- Computadora Intel Core i3-1005G1 CPU
- Cámara fotográfica

d. Reactivos en el laboratorio y campo

- Ácido nítrico y ácido clorhídrico $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$
- Agua destilada
- Agua mineral cielo

3.9 Procesamiento y análisis de datos

3.9.1 Procesamiento estadístico

Con los datos obtenidos de las unidades experimentales se realizó el método descriptivo utilizando software informático para análisis estadístico, las siguientes pruebas pertinentes:

- Análisis de varianza (ANVA).
- Prueba de comparación de Tukey.
- Realizar comparaciones entre los promedios de los tratamientos.

3.9.1.1 Modelo Lineal aditivo.

$$y_{ij} = \mu + \alpha_j + \varepsilon_{ij}.$$

Donde:

Y_{ij} = Observación de la unidad experimental.

j = (repetición) a la que se le ha aplicado el tratamiento i

μ = Medida general del experimento.

α = Efecto del tratamiento i : 1, 2, 3.

E_{ij} = Efecto del error de la observación

3.9.1.2 Esquema de análisis de varianza.

Tabla 8

Análisis de varianza

| F.V. | G.L. | S.C. | C.M. | F.cal. | Sig. |
|--------------|------|--|-------------------------|--|------|
| Tratamientos | 2 | SC _{Trat} | SC _{Trat} /GL | CM _{Trat} / CM _{Error} | ... |
| Error | 3 | SC _{Total} - SC _{Trat} | SC _{Error} /GL | | |
| TOTAL | 5 | SC _{Total} | | | |

Para la comparación de medias (promedios) se utilizó prueba de Tukey, a un intervalo de confianza $\alpha = 0,05$.

3.9.1.3 Hipótesis estadística.

a. Para tratamientos.

- Ho: La especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm en ninguno de los tratamientos tuvo capacidad fitorremediadora en suelos contaminados por metales pesados.
- Ha: La especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm al menos en un tratamiento tuvo la capacidad fitorremediadora en suelos contaminados por metales pesados.

3.9.2 Análisis de datos de los resultados

Para analizar datos de campo y resultados de laboratorio se utilizó un software reconocido y considerado apropiado para proyectos de investigación y análisis estadístico. Para presente investigación se eligió un programa llamado Minitab, que en su efecto ofrece resultados muy dinámico y apropiado.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados

4.1.1 Resultados de la evaluación de la capacidad de propagación de la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm en el sistema de tratamiento

Se analizó la capacidad de propagación de la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm en suelos contaminados con metales pesados, el % de prendimiento, Altura, N° de hojas, N° de brotes respectivamente, en una ficha de registro.

4.1.1.1 Numero de brotes a los 4, 8, y 12 meses en el sistema de tratamiento.

Tabla 9

ANVA para número de brotes a los 4 meses (unidad)

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 1,470 | 0,7350 | 1,83 | 0,302 |
| Error | 3 | 1,205 | 0,4017 | | |
| Total | 5 | 2,675 | | | |

CV=31,12

NS (No significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 9, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador número de brotes a los 4 meses, permiten observar que la diferencia de media entre los tratamientos considerados no es significativo. El coeficiente de variabilidad de 31,12 % es muy alto para la condición del experimento.

Por lo tanto, aceptamos la hipótesis nula (Ho) y rechazamos la hipótesis alterna (Ha), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre el número de brotes a los 4 meses.

Tabla 10

Prueba de Tukey para número de brotes a los 4 meses(unidad)

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|-------|------------|
| 2 | 2 | 3,000 | a |
| 3 | 2 | 2,250 | a |
| 1 | 2 | 1,800 | a |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 10, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para número de brotes, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia en el nacimiento de brotes de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, a los 4 meses fueron T2 con una media de 3,00 brotes, T3 con promedio de 2,25 brotes y último lugar T1 con un promedio de 1,8 brotes. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son similares.

Con esto se demuestra que, en los 3 tratamiento no hubo mayor diferencia en el nacimiento de la especie botánica. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptable para análisis.

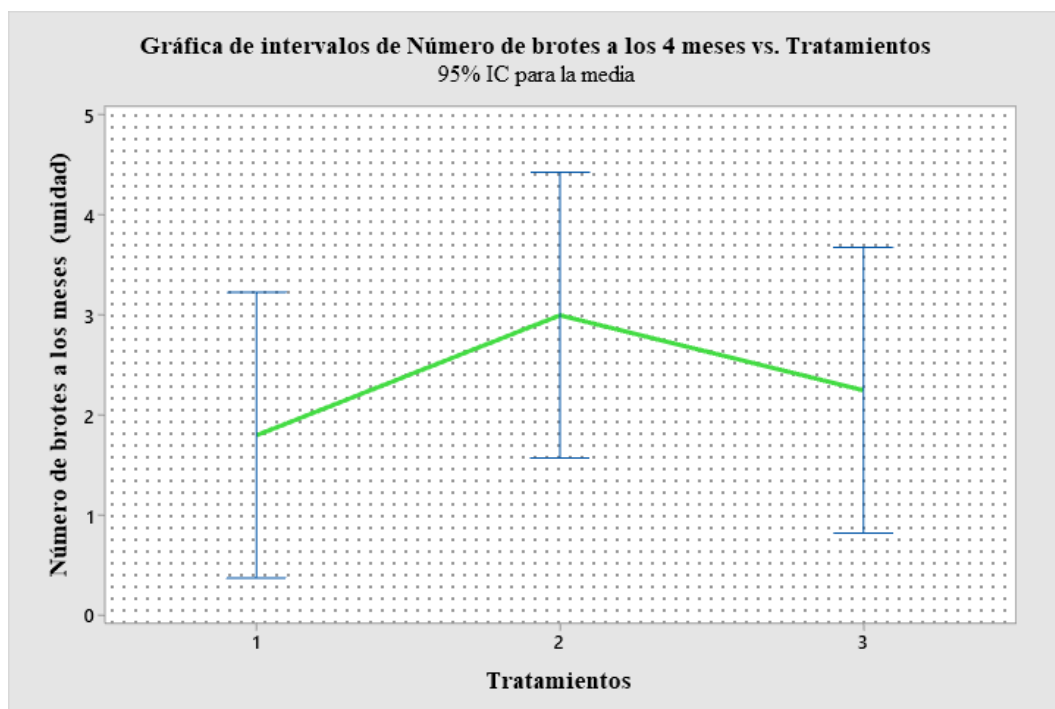


Figura 5. Media para número de brotes a los 4 meses de tratamiento

En la figura 5, se observa que el tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelos contaminados), obtiene el mayor número de brotes, seguido del tratamiento T3 (50% suelo control y 50% suelo contaminado), quedando en el último lugar el tratamiento T1 (100% suelo control).

Tabla 11

ANVA par número de brotes a los 8 meses (unidad)

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 5,5300 | 2,7650 | 18,64 | 0,020 |
| Error | 3 | 0,4450 | 0,1483 | | |
| Total | 5 | 5,9750 | | | |

CV=37,06

* (significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 11, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador número de brotes a los 8 meses, permiten observar que la diferencia de media entre los tratamientos considerados es significativo. El coeficiente de variabilidad de 37,06 % es muy alto para la condición del experimento.

Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula (Ho) y aceptamos la hipótesis alterna (Ha), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre el número de brotes a los 8 meses.

Tabla 12

Prueba de Tukey para número de brotes a los 8 meses(unidad)

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|-------|------------|
| 2 | 2 | 4,150 | a |
| 3 | 2 | 2,900 | a b |
| 1 | 2 | 1,800 | b |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 12, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para número de brotes a los 8 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia en el nacimiento de brotes de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm fueron T2 con una media de 4,15 brotes, T3 con promedio de 2,9 brotes y último lugar T1, con un promedio de 1,8 brotes. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son diferentes.

Con esto se demuestra que, en los 3 tratamiento si hubo una diferencia significativa en el nacimiento de la especie botánica. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptable para análisis.

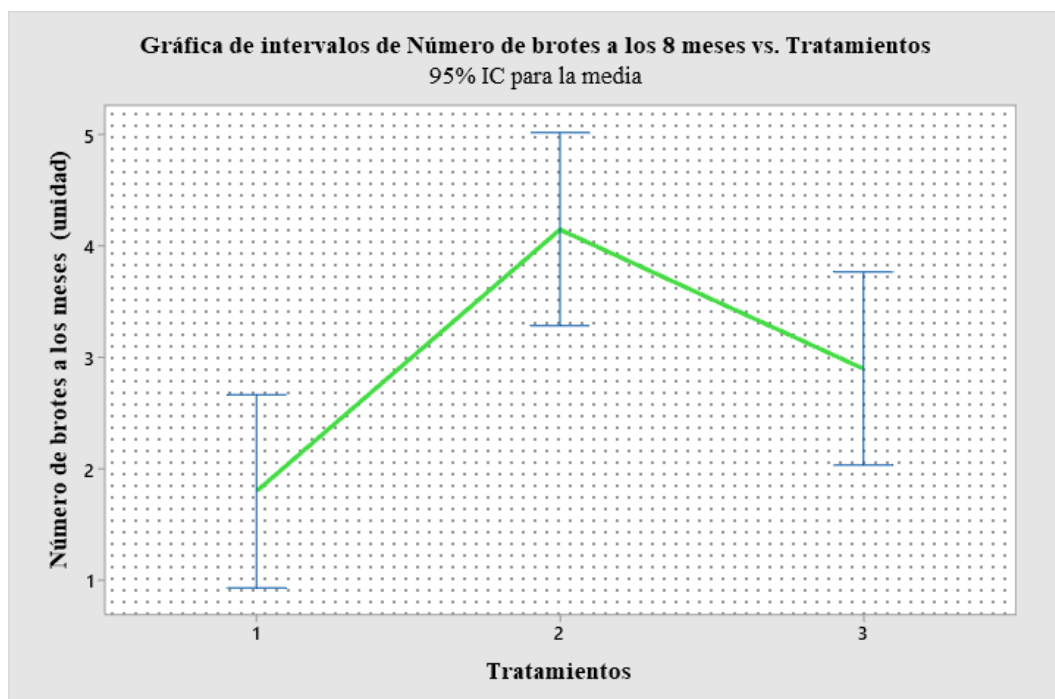


Figura 6. Media para número de brotes a los 8 meses de tratamiento.

En la figura 6, se observa que el tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelos contaminados), obtiene el mayor número de brotes, seguido del tratamiento T3 (50% suelo control y 50% suelo contaminado), quedando en el último lugar el tratamiento T1 (100% suelo control).

Tabla 13

ANVA para número de brotes a los 12 meses (unidad)

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 3,0700 | 1,53500 | 21,93 | 0,016 |
| Error | 3 | 0,2100 | 0,07000 | | |
| Total | 5 | 3,2800 | | | |

CV=30,00

* (significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 13, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador número de brotes a los 12 meses, nos permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es significativo. El coeficiente de variabilidad de 30,00 % es alto para la condición del experimento.

Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula (H_0) y aceptamos la hipótesis alterna (H_a), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre el número de brotes a los 12 meses.

Tabla 14

Prueba de Tukey para número de brotes a los 12 meses (unidad)

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|--------|------------|
| 2 | 2 | 3,5500 | a |
| 3 | 2 | 2,750 | a b |
| 1 | 2 | 1,800 | b |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 14, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para número de brotes a los 12 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia en el nacimiento de brotes de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm fueron T2 con una media de 3,55 brotes, T3 con un promedio de 2,75 brotes y último lugar T1, con un promedio de 1,8 brotes. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son diferentes.

Con esto se demuestra que, en los 3 tratamiento si hubo una diferencia significativa en el nacimiento de la especie botánica. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptable para análisis.

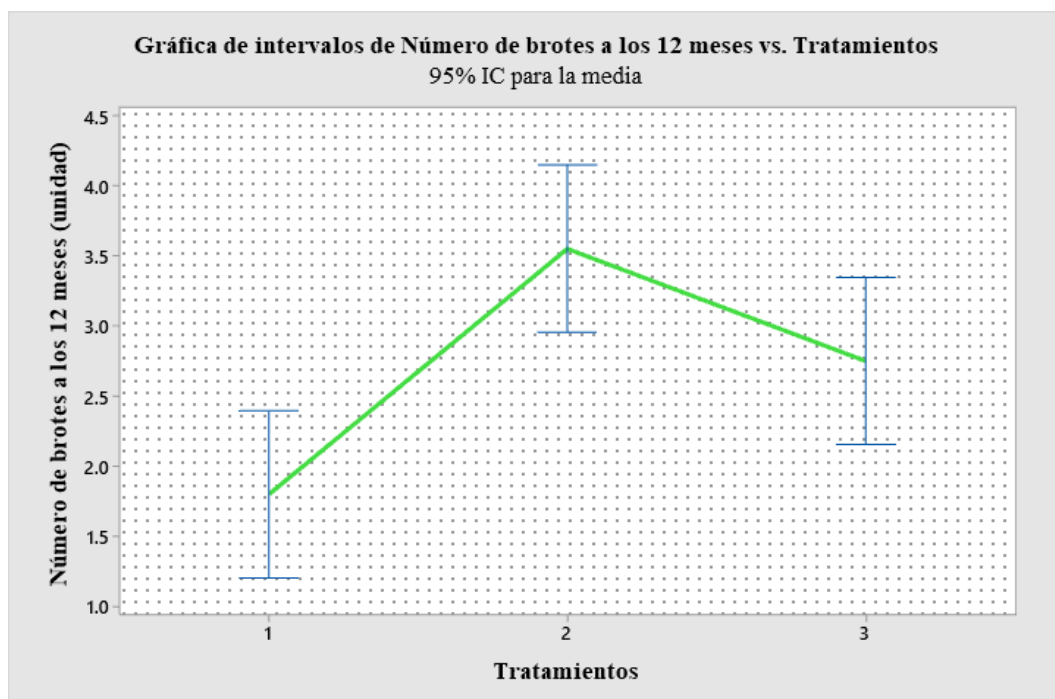


Figura 7. Media para número de brotes a los 12 meses de tratamiento.

En la figura 7, se observa que el tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelos contaminados), obtiene el mayor número de brotes, seguido del tratamiento T3 (50% suelo control y 50% suelo contaminado), quedando en el último lugar el tratamiento T1 (100% suelo control).

4.1.1.2 Altura de la planta a los 4, 8, y 12 meses en el sistema de tratamiento.

Tabla 15

ANVA para altura de la planta a los 4 meses (cm)

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 3,1300 | 1,5650 | 7,28 | 0,071 |
| Error | 3 | 0,6450 | 0,2150 | | |
| Total | 5 | 3,7750 | | | |

CV=24,48

NS (No significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 15, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador altura de la planta a los 4 meses, nos permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados no es significativo. El coeficiente de variabilidad de 24,48 % es alto para la condición del experimento.

Por lo tanto, aceptamos la hipótesis nula (Ho) y rechazamos la hipótesis alterna (Ha), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre la altura de la planta a los 4 meses.

Tabla 16

Prueba de Tukey para altura de la planta a los 4 meses (cm)

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|-------|------------|
| 1 | 2 | 4,500 | a |
| 2 | 2 | 3,400 | a |
| 3 | 2 | 2,750 | a |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 16, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para altura de la planta a los 4 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron menor influencia en el crecimiento de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm fueron T1 con media de 4,5 de altura, T2 con un promedio de 3,4 y último lugar T3 con un promedio de 2,75. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son similares. Con esto se demuestra que, en los 3 tratamiento no hubo una diferencia significativa en el crecimiento de la especie botánica. En condiciones del tratamiento, los resultados son aceptable para análisis.

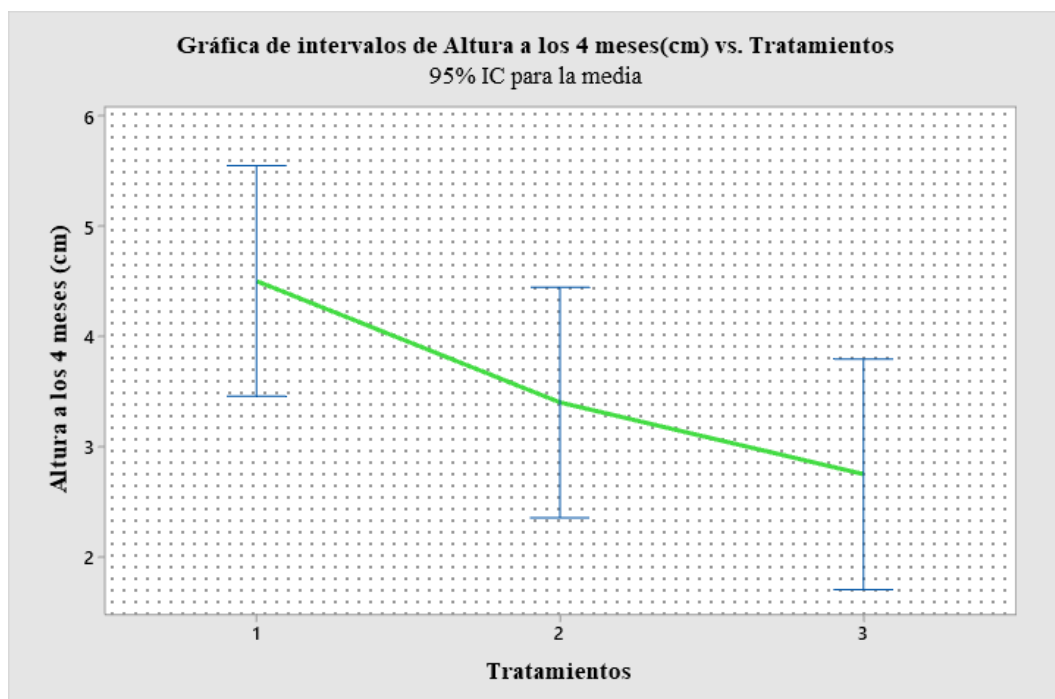


Figura 8. Media para altura de la planta a los 4 meses de tratamiento.

En la figura 8, se observa que el tratamiento T1 (100% suelo control), obtiene mayor altura a los 4 meses, seguido del tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelos contaminados), quedando en el último lugar el tratamiento T3 (50% suelo control y 50% suelo contaminado).

Tabla 17

ANVA para altura de la planta a los 8 meses (cm)

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 53,60 | 26,802 | 4,02 | 0,142 |
| Error | 3 | 20,01 | 6,670 | | |
| Total | 5 | 73,61 | | | |

CV=37,01 NS (No significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 17, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador altura de la planta a los 8 meses, nos permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados no es significativo. El coeficiente de variabilidad de 37,01 % es muy alto para la condición del experimento.

Por lo tanto, aceptamos la hipótesis nula (Ho) y rechazamos la hipótesis alterna (Ha), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre la altura de la planta a los 8 meses.

Tabla 18

Prueba de Tukey para altura de la planta a los 8 meses (cm)

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|-------|------------|
| 1 | 2 | 14,55 | a |
| 2 | 2 | 8,800 | a |
| 3 | 2 | 7,750 | a |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 18, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para altura de la planta a los 8 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia en el crecimiento de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm fueron T1 con una media de 14,55 de altura, T2 con un promedio de 8,8 brotes y último lugar T3 con un promedio de 7,75 de altura. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son similares.

Con esto se demuestra que, en los 3 tratamiento hubo mínima diferencia en el crecimiento de la especie botánica. En condiciones del tratamiento, los resultados son aceptable para análisis, considerado en serie de tiempo.

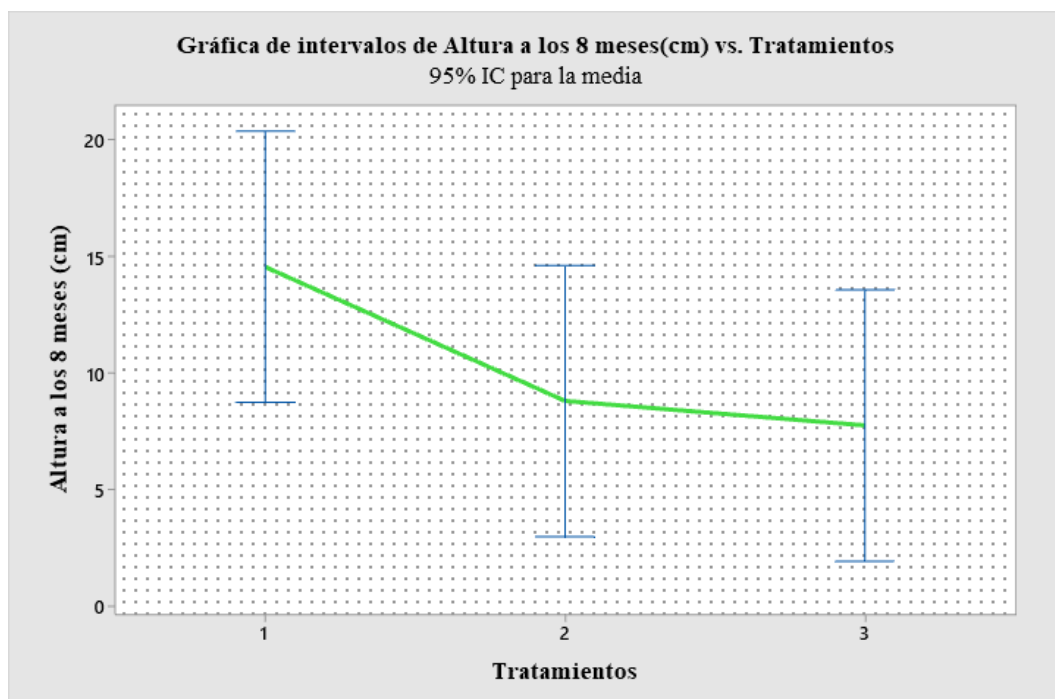


Figura 9. Media para altura de la planta a los 8 meses de tratamiento.

En la figura 9, se observa que el tratamiento T1 (100% suelo control), obtiene mayor altura a los 8 meses, seguido del tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelos contaminados), quedando en el último lugar el tratamiento T3 (50% suelo control y 50% suelo contaminado).

Tabla 19

ANVA para altura de la planta a los 12 meses (cm)

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 20,06 | 10,03 | 0,28 | 0,771 |
| Error | 3 | 106,03 | 35,34 | | |
| Total | 5 | 126,09 | | | |

CV=18,71

NS (No significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 19, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador altura de la planta a los 12 meses, nos permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados no es significativo. El coeficiente de variabilidad de 18,71 % es medio alto para la condición del experimento.

Por lo tanto, aceptamos la hipótesis nula (H_0) y rechazamos la hipótesis alterna (H_a), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre la altura de la planta a los 12 meses.

Tabla 20

Prueba de Tukey para altura de la planta a los 12 meses (cm)

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|-------|------------|
| 2 | 2 | 28,55 | a |
| 1 | 2 | 27,65 | a |
| 3 | 2 | 24,30 | a |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 20, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para altura de la planta a los 12 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron menor influencia en el crecimiento de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm fueron T2 con una media de 28,55 de altura, T1 con un promedio de 27,65 de altura y último lugar T3 con un promedio de 24,30 de altura. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son similares.

Con esto se demuestra que, en los 3 tratamiento hubo mínima diferencia en la altura de la especie botánica, al término del tratamiento. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptable para análisis.

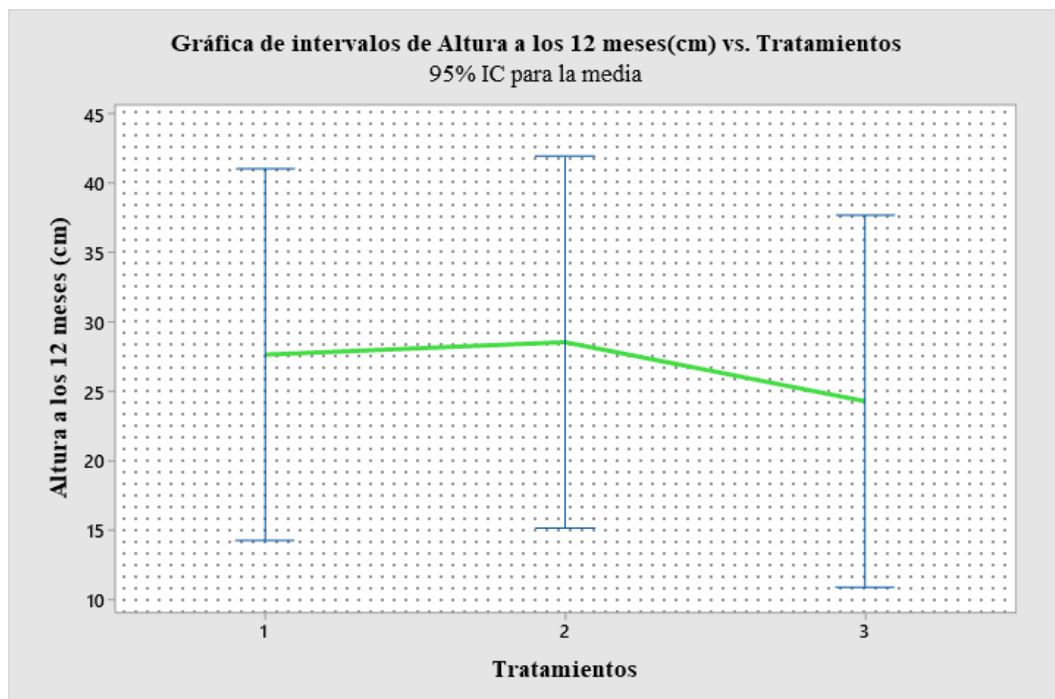


Figura 10. Media para altura de la planta a los 12 meses de tratamiento.

En la figura 10, se observa que el tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelos contaminados), obtiene mayor altura a los 12 meses, seguido del tratamiento T1 (100% suelo control), quedando en el último lugar el tratamiento T3 (50% suelo control y 50% suelo contaminado).

a. *Crecimiento en series de tiempo de Lupinus cuzcensis C.P. Sm en los tratamientos.*

Después del término del tratamiento, se pudo diferenciar en serie de tiempo, la evolución y crecimiento de la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, considerando que las plantas nacieron de la semilla (sembrío controlado) en macetas con sustrato preparado para el tratamiento (T1, T2, T3), que estos contenían metales pesados como el plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr) y otros, elementos que provenientes de los relaves mineros.

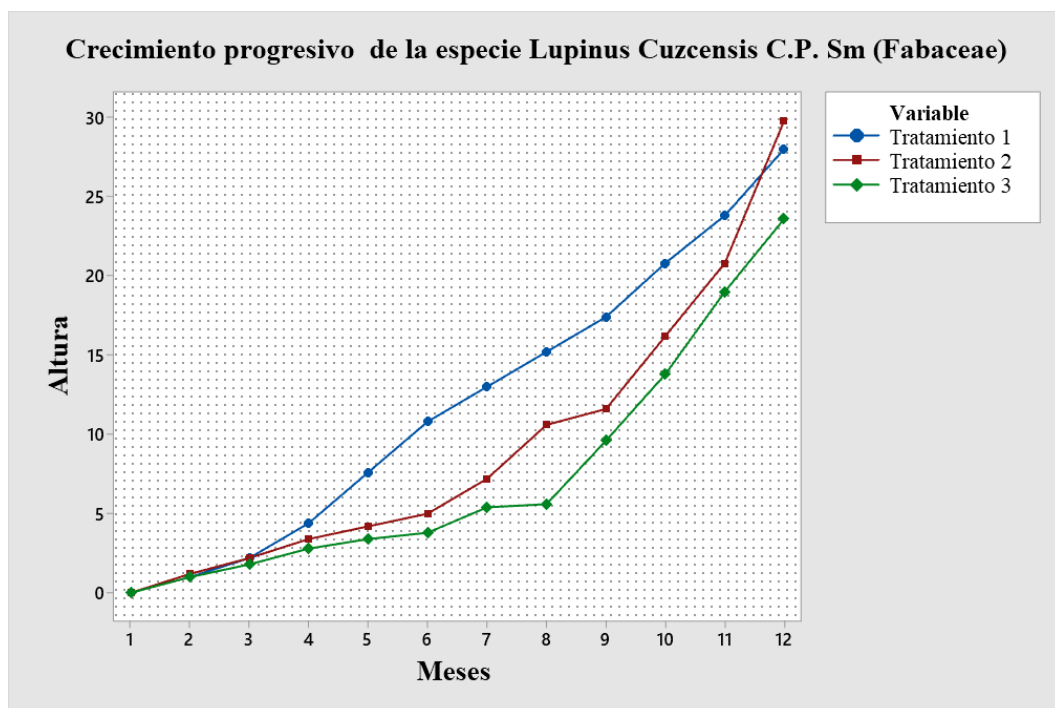


Figura 11. Crecimiento en series de tiempo de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm en los tratamientos.

En la figura 11, se observa el crecimiento progresivo en serie tiempo de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, entre lo que más destaca es el T2 (80% suelos control y 20% suelos contaminados), que obtiene mayor altura a los 12 meses en el tratamiento.

4.1.1.3 Numero de hojas a los 4, 8, y 12 meses en el sistema de tratamiento.

Tabla 21

ANVA para número de hojas a los 4 meses (unidad)

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 8,890 | 4,445 | 1,95 | 0,287 |
| Error | 3 | 6,850 | 2,283 | | |
| Total | 5 | 15,740 | | | |

CV=23,98

NS (No significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 21, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador número de hojas a los 4 meses, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados no es significativo. El coeficiente de variabilidad de 23,98 % es alto para la condición del experimento.

Por lo tanto, aceptamos la hipótesis nula (H_0) y rechazamos la hipótesis alterna (H_a), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre el número de hojas a los 4 meses.

Tabla 22

Prueba de Tukey para número de hojas a los 4 meses (unidad)

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|-------|------------|
| 1 | 2 | 9,05 | a |
| 2 | 2 | 7,00 | a |
| 3 | 2 | 6,150 | a |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 22, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para número de hojas a los 4 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia en número de hojas de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm a los 4 meses fueron T1(suelo control), con una media de 9,05 hojas y T2 con un promedio de 7,00 y último lugar T3 con un promedio de 6,15 hojas. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son similares.

Con esto se demuestra que, en los 3 tratamiento hubo mínima diferencia en número de hojas de la especie botánica. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptable para análisis.

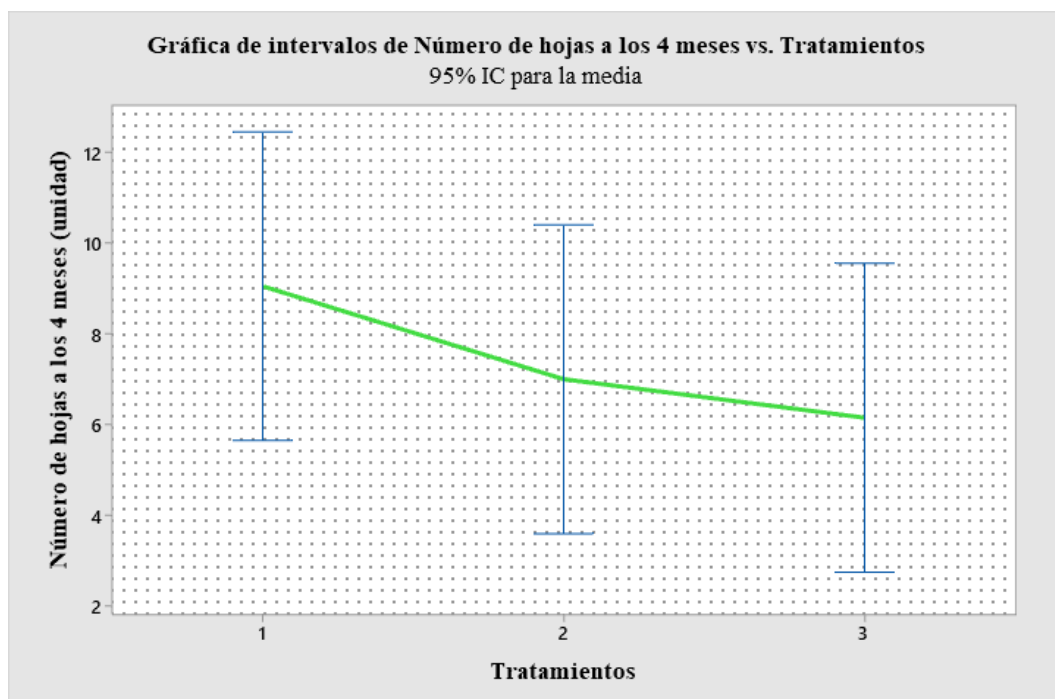


Figura 12. Media para número de hojas a los 4 meses de tratamiento

En la figura 12, se observa que el tratamiento T1(100% suelo control), obtiene el mayor número de hojas, seguido del tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelo contaminado), quedando en el último lugar el tratamiento T3 (50% suelo control y 50% suelo contaminado).

Tabla 23

ANVA para número de hojas a los 8 meses (unidad)

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 139,42 | 69,71 | 3,84 | 0,149 |
| Error | 3 | 54,45 | 18,15 | | |
| Total | 5 | 193,87 | | | |

CV=20,71

NS (No significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 23, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador número de hojas a los 8 meses, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados no es significativo. El coeficiente de variabilidad de 20,71 % es alto para la condición del experimento.

Por lo tanto, aceptamos la hipótesis nula (Ho) y rechazamos la hipótesis alterna (Ha), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre el número de hojas a los 8 meses.

Tabla 24

Prueba de Tukey para número de hojas a los 8 meses (unidad)

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|-------|------------|
| 1 | 2 | 36,55 | a |
| 2 | 2 | 28,65 | a |
| 3 | 2 | 25,00 | a |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 24, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para número de hojas a los 8 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron menor influencia en número de hojas de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm a los 8 meses fueron T1(suelo control), con una media de 36,55 hojas, y T2 con un promedio de 28,65 y último lugar T3 con un promedio de 25,00 hojas. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son similares.

Con esto se demuestra que, en los 3 tratamiento hubo mínima diferencia en número de hojas de la especie botánica. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptable para análisis.

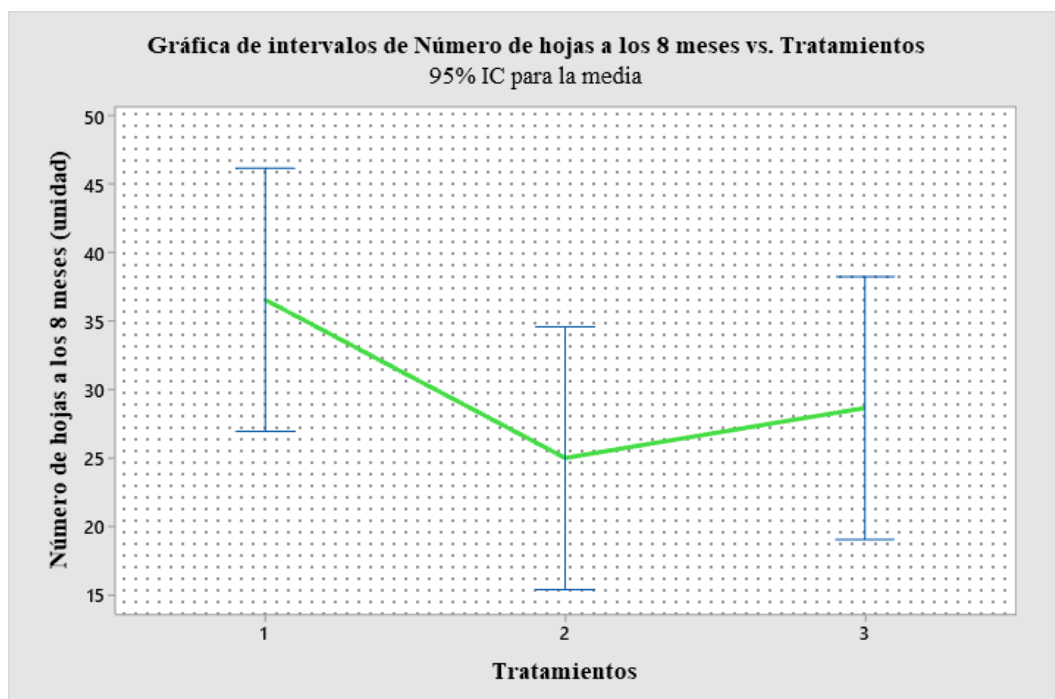


Figura 13. Media para número de hojas a los 8 meses de tratamiento.

En la figura 13, se observa que el tratamiento T1(100% suelo control), obtiene el mayor número de hojas, seguido del tratamiento T3 (50% suelo control y 50% suelo contaminado), quedando en el último lugar el tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelo contaminado).

Tabla 25

ANVA para número de hojas a los 12 meses (unidad)

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 3536,6 | 1768,3 | 9,87 | 0,048 |
| Error | 3 | 537,2 | 179,1 | | |
| Total | 5 | 4073,8 | | | |

CV=29,56

*(significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 25, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador número de hojas a los 12 meses, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es significativo. El coeficiente de variabilidad de 29,56 % es alto para la condición del experimento.

Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula (Ho) y aceptamos la hipótesis alterna (Ha), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre el número de hojas a los 12 meses.

Tabla 26

Prueba de Tukey para número de hojas a los 12 meses (unidad)

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|---------------------|----------|--------------|-------------------|
| 1 | 2 | 129,2 | a |
| 2 | 2 | 89,65 | a b |
| 3 | 2 | 70,90 | b |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 26, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para número de hojas a los 8 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia en número de hojas de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm a los 12 meses fueron T1(suelo control), con una media de 129,2 hojas, T2 con un promedio de 89,65 y último lugar T3 con un promedio de 70,90 hojas. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son diferentes.

Con esto se demuestra que, en los 3 tratamiento hubo diferencia considerable en número de hojas de la especie botánica. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptable para análisis.

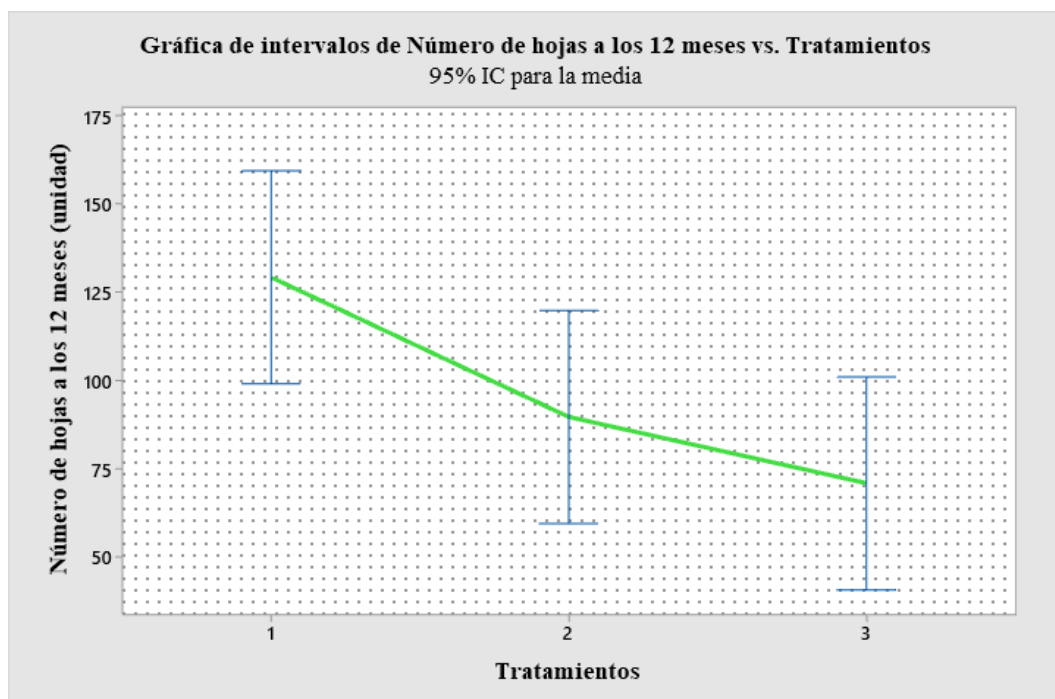


Figura 14. Media para número de hojas a los 12 meses de tratamiento

En la figura 14, se observa que el tratamiento T1(100% suelo control), obtiene el mayor número de hojas, seguido del tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelo contaminado), y quedando en el último lugar el tratamiento T3 (50% suelo control y 50% suelo contaminado).

4.1.1.4 % Prendimiento a los 4, 8, 12 meses en el sistema de tratamiento.

Tabla 27

ANVA para prendimiento a los 4 meses (%)

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 560,0 | 280,0 | 1,78 | 0,310 |
| Error | 3 | 472,4 | 157,5 | | |
| Total | 5 | 1032,4 | | | |

CV= 30,43

NS (No significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 27, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador para Prendimientos (%) a los 4 meses, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados no es significativo. El coeficiente de variabilidad de 30,43 % es muy alto para la condición del experimento.

Por lo tanto, aceptamos la hipótesis nula (Ho) y rechazamos la hipótesis alterna (Ha), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre el Prendimientos (%) a los 4 meses.

Tabla 28

Prueba de Tukey para prendimiento a los 4 meses (%)

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|-------|------------|
| 2 | 2 | 60,00 | a |
| 3 | 2 | 45,0 | a |
| 1 | 2 | 36,65 | a |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 28, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para Prendimiento (%) a los 4 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm a los 4 meses fueron en T2 con una media de 60 % prendimiento, T3 con un promedio de 45,0 % y último lugar T1 con un promedio de 36,65 %. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son similares.

Con esto se demuestra que, en los 3 tratamiento hubo diferencia mínima en % prendimiento de la especie botánica. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptable para análisis.

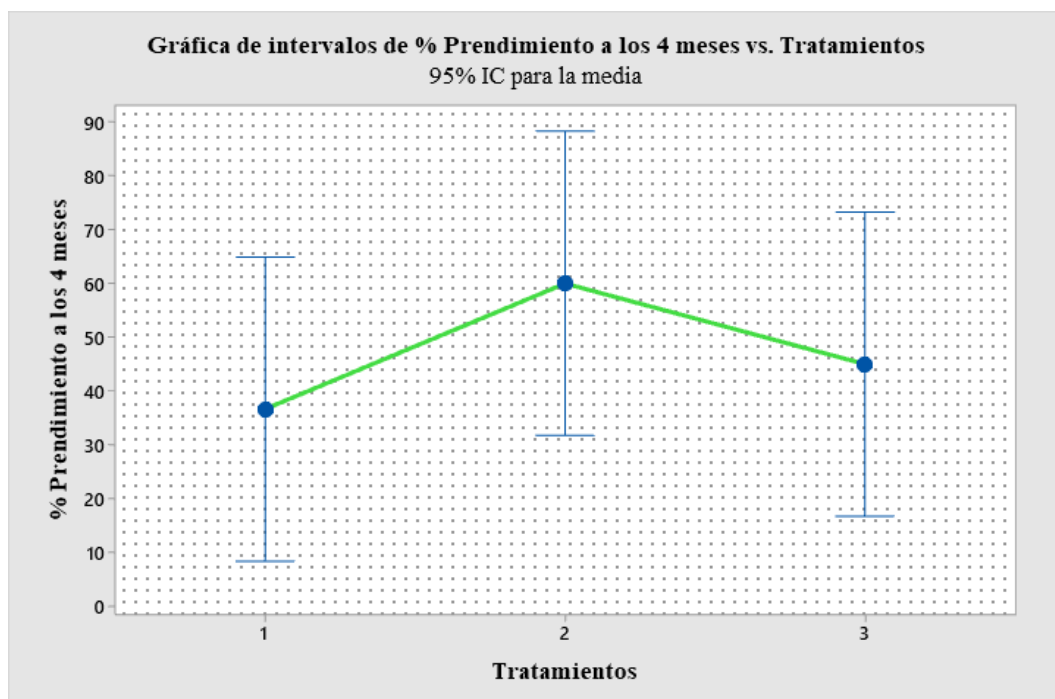


Figura 15. Media para % prendimiento a los 4 meses de tratamiento

En la figura 15, se observa que el tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelo contaminado), obtiene el mayor % prendimiento a los 4 meses, seguido del tratamiento T3, (50% suelo control y 50% suelo contaminado), y quedando en el último lugar el tratamiento T1(100% suelo control).

Tabla 29

ANVA para prendimiento a los 8 meses (%)

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 1735,6 | 867,81 | 8,74 | 0,056 |
| Error | 3 | 298,0 | 99,33 | | |
| Total | 5 | 2033,6 | | | |

CV=34,92

NS (No significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 29, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador para Prendimientos (%) a los 8 meses, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados no es significativo. El coeficiente de variabilidad de 34,92 % es muy alto para la condición del experimento.

Por lo tanto, aceptamos la hipótesis nula (Ho) y rechazamos la hipótesis alterna (Ha), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre el Prendimientos (%) a los 8 meses.

Tabla 30

Prueba de Tukey para prendimiento a los 8 meses (%)

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|-------|------------|
| 2 | 2 | 78,30 | a |
| 3 | 2 | 58,30 | a |
| 1 | 2 | 36,65 | a |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 30, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para Prendimiento (%) a los 8 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm a los 8 meses fueron en T2 con una media de 78,30 % prendimiento, T3 con un promedio de 58,30 % y último lugar T1 con un promedio de 36,65 %. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son similares.

Con esto se demuestra que, en los 3 tratamiento hubo diferencia mínima en % prendimiento de la especie botánica. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptable para análisis.

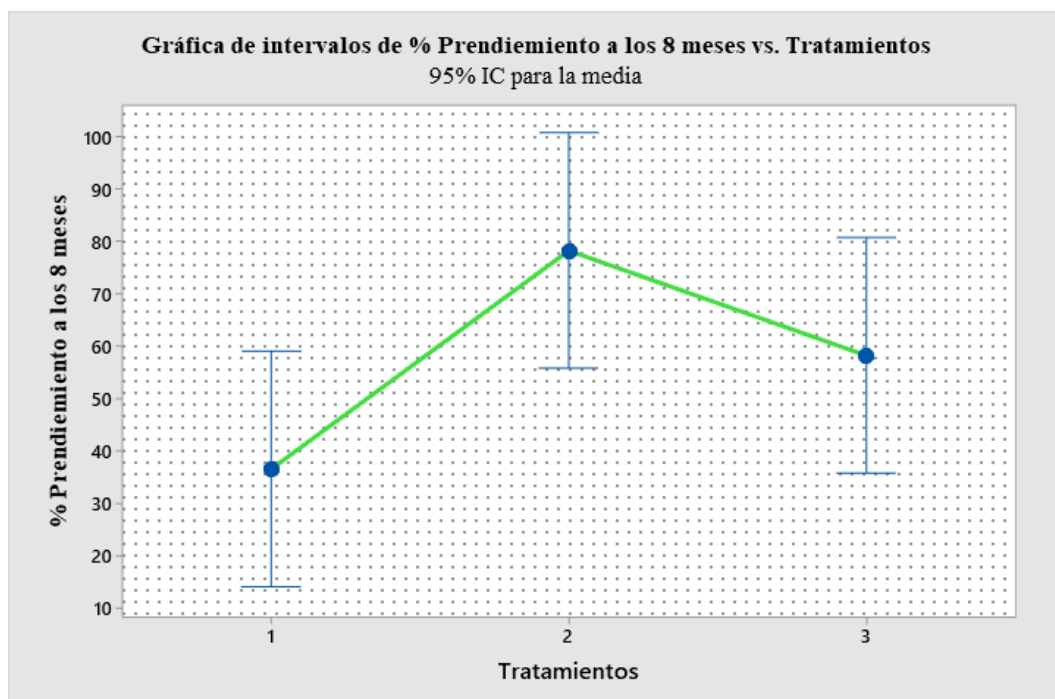


Figura 16. Media para % prendimiento a los 8 meses de tratamiento.

En la figura 16, se observa que el tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelo contaminado), obtiene el mayor % prendimiento a los 8 meses, seguido del tratamiento T3, (50% suelo control y 50% suelo contaminado), y quedando en el último lugar el tratamiento T1(100% suelo control).

Tabla 31

ANVA para prendimiento a los 12 meses (%)

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 1225,96 | 612,98 | 23,61 | 0,015 |
| Error | 3 | 77,89 | 25,96 | | |
| Total | 5 | 1303,85 | | | |

CV=29,67

*(significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 31, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador para Prendimientos (%) a los 12 meses, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es significativo. El coeficiente de variabilidad de 29,67 % es alto para la condición del experimento.

Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula (H_0) y aceptamos la hipótesis alterna (H_a), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre el Prendimientos (%) a los 12 meses.

Tabla 32

Prueba de Tukey para prendimiento a los 12 meses (%)

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|-------|------------|
| 2 | 2 | 71,65 | a |
| 3 | 2 | 55,00 | a b |
| 1 | 2 | 36,65 | b |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 32, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para Prendimiento (%) a los 12 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm a los 12 meses fueron en T2 con una media de 71,65% prendimiento, T3 con un promedio de 55,00 % y último lugar T1 con un promedio de 36,65 %. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son similares.

Con esto se demuestra que, en los 3 tratamiento hubo diferencia importante en % prendimiento de la especie botánica. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptable para análisis.

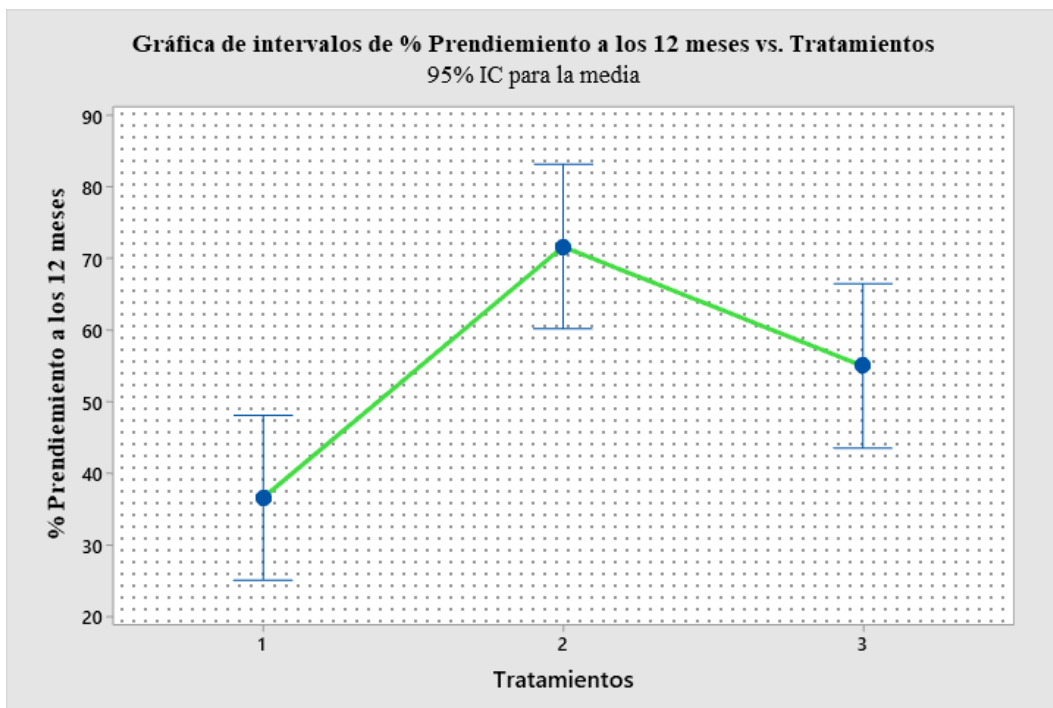


Figura 17. Media para % prendimiento a los 12 meses de tratamiento.

En la figura 17, se observa que el tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelo contaminado), obtiene el mayor % prendimiento a los 12 meses, seguido del tratamiento T3, (50% suelo control y 50% suelo contaminado), y quedando en el último lugar el tratamiento T1(100 % suelo control).

4.1.2 Resultados de la capacidad de remoción de metales pesados, con la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm

Se analizó la capacidad de remoción de metales pesados de los suelos, con la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm. Para la investigación se consideró la medición de parámetros siguiente; pH (1:1), C.E (dS/m) en campo, y en laboratorio la concentración de metales pesados, Plomo (Pb), Cadmio (Cd), y Cromo (Cr) respectivamente, en un tiempo cero, y a los 12 meses después del tratamiento terminado, los resultados del análisis de laboratorio se muestran en la tabla 33 del presente trabajo de investigación.

Tabla 33*Concentración de metales pesados en los tratamientos, antes y después de los 12 meses*

| Tratamientos | | | | Valores | | | | Metodología |
|--|---------------|-------|-------|---------|---------|-------|---------------------------|-------------|
| Porcentaje de relave minero (%) y suelo control | Determinación | | Antes | | Después | | | |
| | | | R1 | R2 | R1 | R2 | | |
| T1 0 % de suelos contaminado con relave minero + 100 % de suelo control | - Ph | (1:1) | 6,18 | 6,22 | 5,69 | 5,77 | Método de digestión acida | |
| | - C.E | dS/m | 0,07 | 1,09 | 1,45 | 1,49 | | |
| | - Plomo (Pb) | ppm | 10,02 | 11,15 | 10,32 | 10,87 | | |
| | - Cadmio(Cd) | ppm | 0,19 | 0,21 | 0,28 | 0,17 | | |
| | - Cromo (Cr) | ppm | 7,79 | 7,31 | 6,66 | 7,50 | | |
| T2 20 % de suelos contaminado con relave minero + 80 % de suelo control | - Ph | (1:1) | 7,23 | 7,27 | 6,09 | 6,05 | Método de digestión acida | |
| | - C.E | dS/m | 3,19 | 3,20 | 1,72 | 2,12 | | |
| | - Plomo (Pb) | ppm | 8,24 | 8,86 | 10,64 | 9,73 | | |
| | - Cadmio(Cd) | ppm | 0,23 | 0,24 | 0,24 | 0,22 | | |
| | - Cromo (Cr) | ppm | 8,55 | 8,47 | 7,08 | 9,84 | | |
| T3 50 % de suelos contaminado con relave minero + 50 % de suelo control | - Ph | (1:1) | 6,70 | 6,74 | 6,66 | 6,22 | Método de digestión acida | |
| | - C.E | dS/m | 2,38 | 2,76 | 2,66 | 3,17 | | |
| | - Plomo (Pb) | ppm | 9,70 | 12,84 | 11,21 | 10,43 | | |
| | - Cadmio(Cd) | ppm | 0,22 | 0,20 | 0,24 | 0,26 | | |
| | - Cromo (Cr) | ppm | 7,01 | 9,90 | 10,04 | 10,11 | | |

Nota: Resultados de un antes y después del tratamiento, grupo en fila tratamientos 1,2,3 = columna primera repetición R1+ segunda repetición R2.

Fuente: Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente de la Universidad Nacional Agraria la Molina, 2021.

Tabla 34*ANVA para concentración de plomo total a los 12 meses del tratamiento*

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 0,4146 | 0,2073 | 0,72 | 0,557 |
| Error | 3 | 0,8695 | 0,2898 | | |
| Total | 5 | 1,2841 | | | |

CV=4,81

NS (No significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 34, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador para plomo total a los 12 meses del tratamiento, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados no es significativo. El coeficiente de variabilidad de 4,81 % es muy bajo para condición del experimento.

Por lo tanto, aceptamos la hipótesis nula (H_0) y rechazamos la hipótesis alterna (H_a), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre plomo total a los 12 meses.

Tabla 35

Prueba de Tukey para de plomo total a los 12 meses del tratamiento

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|--------|------------|
| 3 | 2 | 10,820 | a |
| 1 | 2 | 10,595 | a |
| 2 | 2 | 10,185 | a |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 35, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para plomo total a los 12 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia fueron en T3 con una media de 10,82 % concentración de plomo total, T1 con un promedio de 10,59 % y último lugar T2 con un promedio de 10,18 %. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son similares.

Con estos resultados se demuestra que, en los 3 tratamiento no hubo diferencia en la remoción de plomo total. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptable para análisis.

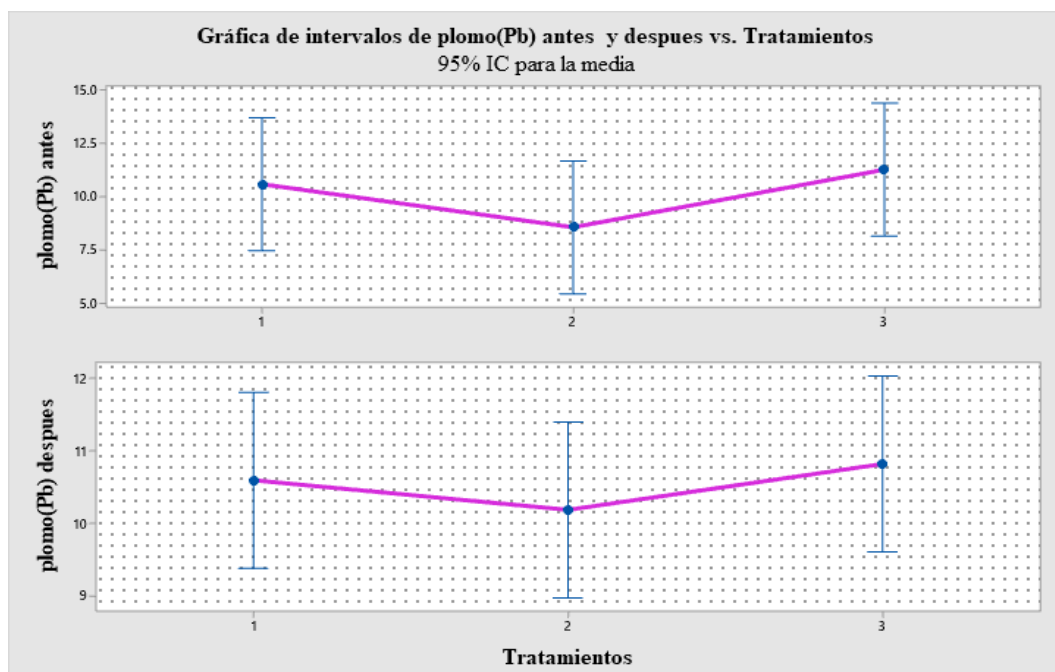


Figura 18. Media para de plomo total antes y después de 12 meses de tratamiento

En la figura 18, se observa la comparación en tratamientos con la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, de un antes y después de los 12 meses de tratamiento. Nos permite comprobar que, en los tratamientos T1(100 % suelo control), tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelo contaminado), y tratamiento T3(50% suelo control y 50% suelo contaminado), estadísticamente no existe una diferencia significativa en la remoción de metal pesado (plomo).

Tabla 36

ANVA para concentración de cadmio total a los 12 meses del tratamiento

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 0,000700 | 0,000350 | 0,16 | 0,857 |
| Error | 3 | 0,006450 | 0,002150 | | |
| Total | 5 | 0,007150 | | | |

CV=16,9

NS (No significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 36, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador para cadmio total a los 12 meses del tratamiento, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados no es significativo. El coeficiente de variabilidad de 16,9 % es considerable para condición del experimento.

Por lo tanto, aceptamos la hipótesis nula (H_0) y rechazamos la hipótesis alterna (H_a), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre cadmio total a los 12 meses.

Tabla 37

Prueba de Tukey para de cadmio total a los 12 meses del tratamiento

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|---------------------|----------|--------------|-------------------|
| 3 | 2 | 0,2500 | a |
| 2 | 2 | 0,2300 | a |
| 1 | 2 | 0,2250 | a |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 37, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para cadmio total a los 12 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia fueron en T3 con una media de 0,25 % concentración de cadmio total, T2 con un promedio de 0,23 % y último lugar T1 con un promedio de 0,22 %. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son similares.

Con estos resultados se demuestra que, en los 3 tratamiento no hubo diferencia en la remoción de cadmio total. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptable para análisis

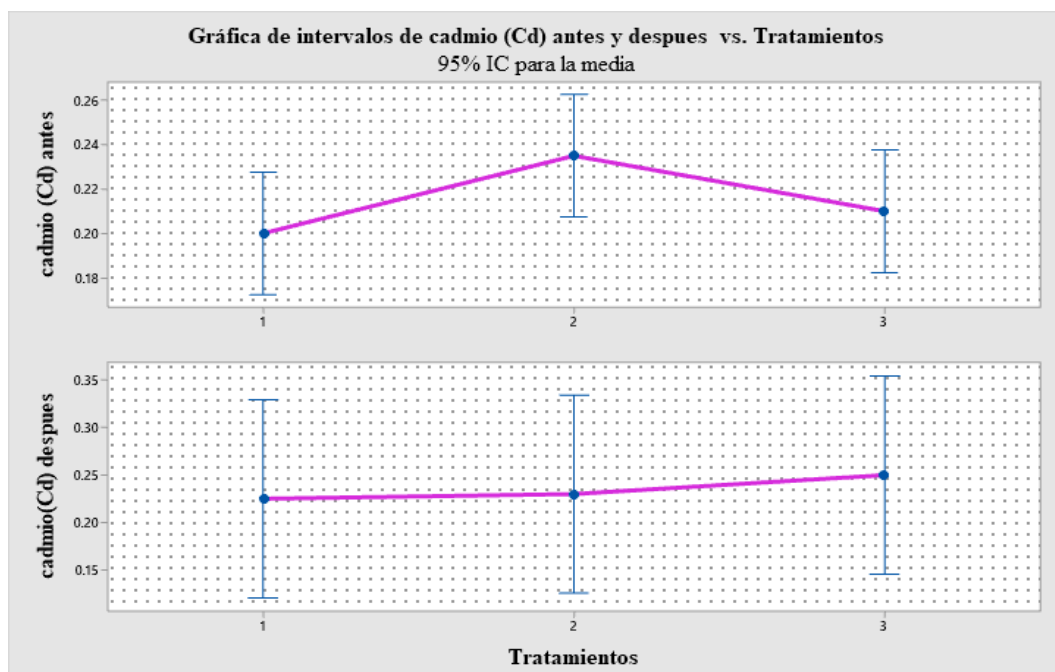


Figura 19. Media para de cadmio total antes y después de 12 meses de tratamiento

En la figura 19, se observa la comparación en tratamientos con la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, de un antes y después de los 12 meses de tratamiento. Nos permite comprobar que, en los tratamientos T1(100 % suelo control), tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelo contaminado), y tratamiento T3(50% suelo control y 50% suelo contaminado), estadísticamente no existe una diferencia significativa en la remoción de metal pesado (cadmio).

Tabla 38

ANVA para concentración de cromo total a los 12 meses del tratamiento

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamiento | 2 | 8,988 | 4,494 | 3,24 | 0,178 |
| Error | 3 | 4,164 | 1,388 | | |
| Total | 5 | 13,152 | | | |

CV=19,00

NS (No significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 38, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador para cromo total a los 12 meses del tratamiento, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados no es significativo. El coeficiente de variabilidad de 19,00 % es considerable para condición del experimento.

Por lo tanto, aceptamos la hipótesis nula (H_0) y rechazamos la hipótesis alterna (H_a), en la diferencia entre los efectos de los tratamientos sobre cromo total a los 12 meses.

Tabla 39

Prueba de Tukey para de cromo total a los 12 meses del tratamiento

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|---------|------------|
| 3 | 2 | 10,0750 | a |
| 2 | 2 | 8,46 | a |
| 1 | 2 | 7,080 | a |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 39, se muestra los resultados de la prueba de Tukey para cromo total a los 12 meses, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia fueron en T3 con una media de 10,07 % concentración de cromo total, T2 con un promedio de 8,46 % y último lugar T1 con un promedio de 7,08 %. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son similares.

Con estos resultados se demuestra que, en los 3 tratamiento no hubo diferencia en la remoción de cromo total. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptable para análisis

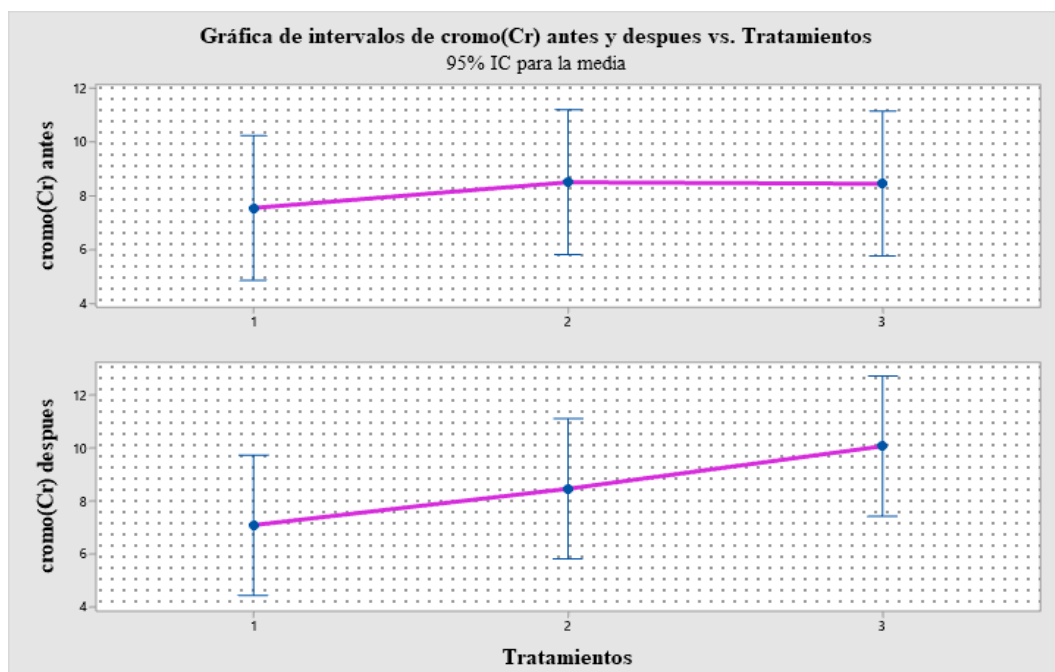


Figura 20. Media para de cromo total antes y después de 12 meses del tratamiento

En la figura 20, se observa la comparación en tratamientos con la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, de un antes y después de los 12 meses de tratamiento. Nos permite comprobar que, en los tratamientos T1(100 % suelo control), tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelo contaminado), existe una ligera disminución de la concentración de cromo total, y en el tratamiento T3(50% suelo control y 50% suelo contaminado) estadísticamente no existe significancia.

4.1.3 Resultados de la capacidad de acumulación de metales pesados en la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm

Se analizó la capacidad de a emulación de metales pesados de los suelos, con la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm. Para la investigación se consideró la concentración de metales pesados en la biomasa de la especie, como el Plomo (Pb), Cadmio (Cd), y Cromo (Cr), y su evaluación en el laboratorio, en un tiempo de 12

meses después del tratamiento, los resultados del análisis de laboratorio se muestran en la tabla 40 del presente trabajo de investigación.

Tabla 40

Concentración de metales pesado en la biomasa de la especie Lupinus cuzcensis C.P. Sm

| | Tratamiento con la especie <i>Lupinus cuzcensis</i> C.P. Sm | Determinación | Valor | | Metodología |
|----|--|-------------------|-------|------|---|
| | | | R1 | R2 | |
| T1 | - 0 % de suelos contaminado con relave minero + 100 % de suelo control | - Plomo (Pb) ppm | 8,09 | 8,07 | Espectrofotometría de absorción atómica |
| | | - Cadmio (Cd) ppm | 0,90 | 0,88 | |
| | | - Cromo (Cr) ppm | 1,99 | 2,01 | |
| T2 | - 20 % de suelos contaminado con relave minero + 80 % de suelo control | - Plomo (Pb) ppm | 6,93 | 6,99 | |
| | | - Cadmio (Cd) ppm | 0,99 | 1,01 | |
| | | - Cromo (Cr) ppm | 1,87 | 1,89 | |
| T3 | - 50 % de suelos contaminado con relave minero + 50 % de suelo control | - Plomo (Pb) ppm | 7,25 | 7,23 | |
| | | - Cadmio (Cd) ppm | 1,02 | 1,06 | |
| | | - Cromo (Cr) ppm | 1,67 | 1,59 | |

Nota: Resultados después del tratamiento, grupo en fila tratamientos 1,2,3 = columna primera repetición R1+ segunda repetición R2.

Fuente: Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente de la Universidad Nacional Agraria la Molina, 2021.

Tabla 41

ANVA para acumulación de plomo total en la biomasa de Lupinus cuzcensis C.P. Sm

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 1,35893 | 0,679467 | 926,55 | 0,000 |
| Error | 3 | 0,00220 | 0,000733 | | |
| Total | 5 | 1,36113 | | | |

CV=7,03

*(significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 41, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador para acumulación de plomo total analizadas en la biomasa de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es significativo. El coeficiente de variabilidad de 7,03 % es medio bajo para la condición del experimento.

Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula (Ho) y aceptamos la hipótesis alterna (Ha).

Tabla 42

Prueba de Tukey para acumulación de plomo total en la biomasa de Lupinus cuzcensis C.P. Sm

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|--------|------------|
| 1 | 2 | 8,0800 | a |
| 3 | 2 | 7,2400 | b |
| 2 | 2 | 6,9600 | c |

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

En la tabla 42, se muestra los resultados de la prueba de Tukey acumulación de plomo total analizadas en la biomasa de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia fueron en T1 con una media de 8,08 % concentración de plomo, T3 con un promedio de 7,24 %, y último lugar T2 con un promedio de 6,96 %. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son muy diferentes.

Con estos resultados se demuestra que, en los 3 tratamiento hubo diferencias importantes en la acumulación de plomo total. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptables para análisis de remoción de los metales pesados.

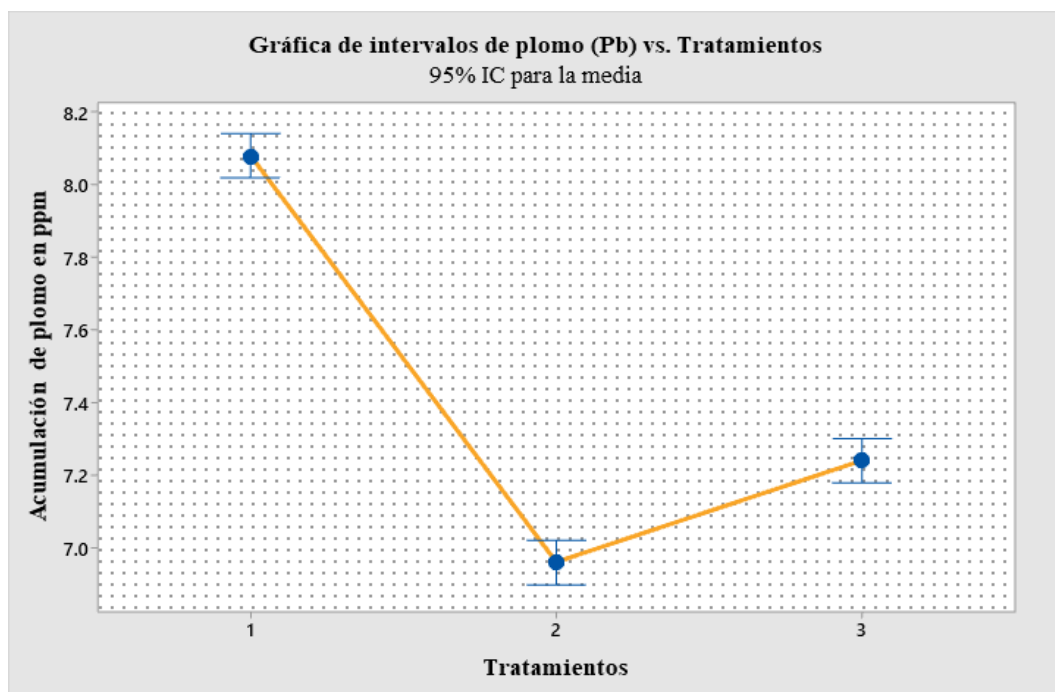


Figura 21. Media para acumulación de plomo a los 12 meses del tratamiento

En la figura 21, se observa que el tratamiento T1(100 % suelo control) obtiene el mayor % de concentración de plomo al término del tratamiento, seguido del tratamiento T3 (50% suelo control y 50% suelo contaminado), y quedando en el último lugar el tratamiento T3 (80% suelos control y 20% suelo contaminado).

Tabla 43

ANVA para acumulación de cadmio total en la biomasa de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 0,024133 | 0,012067 | 30,17 | 0,010 |
| Error | 3 | 0,001200 | 0,000400 | | |
| Total | 5 | 0,025333 | | | |

CV=7,29

*(significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 43, los resultados obtenidos del análisis de varianza

(ANOVA) aplicado al indicador para acumulación de cadmio total analizadas en la biomasa de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es significativo. El coeficiente de variabilidad de 7,29 % es medio bajo para la condición del experimento.

Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula (Ho) y aceptamos la hipótesis alterna (Ha).

Tabla 44

Prueba de Tukey para acumulación de cadmio total en la biomasa de Lupinus cuzcensis C.P. Sm

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|---------------------|----------|--------------|-------------------|
| 3 | 2 | 1,0400 | a |
| 2 | 2 | 1,0000 | a |
| 1 | 2 | 0,8900 | b |

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la tabla 44, se muestra los resultados de la prueba de Tukey acumulación de cadmio total analizadas en la biomasa de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia fueron en T3 con una media de 1,04 % concentración de cadmio, T2 con un promedio de 1,00 % y último lugar T1 con un promedio de 0,89 %. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son muy diferentes.

Con estos resultados se demuestra que, en los 3 tratamiento hubo diferencias importantes en la acumulación de cadmio total. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptables para análisis de remoción de los metales pesados.

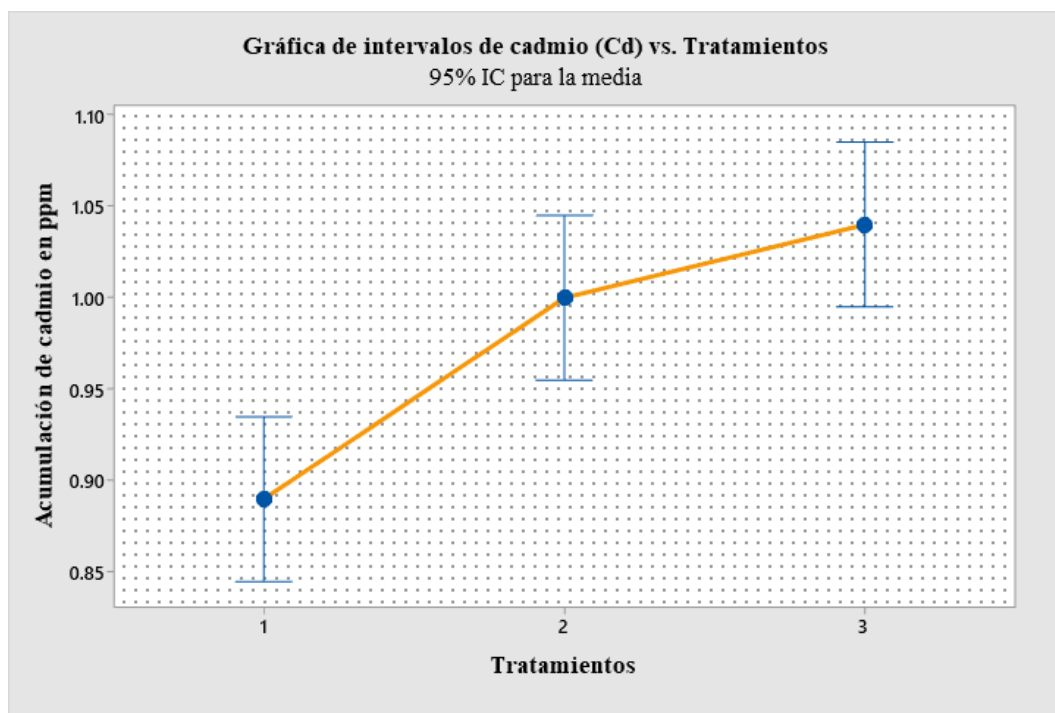


Figura 22. Media para acumulación de cadmio a los 12 meses del tratamiento

En la figura 22, se observa que el tratamiento T3 (50% suelo control y 50% suelo contaminado) obtiene el mayor % de concentración de cadmio al término del tratamiento, seguido del tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelo contaminado), y quedando en el último lugar el tratamiento T1(100 % suelo control).

Tabla 45

ANVA para de la acumulación de cromo total en la biomasa de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm

| Fuentes de variación | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Tratamientos | 2 | 0,142533 | 0,071267 | 59,39 | 0,004 |
| Error | 3 | 0,003600 | 0,001200 | | |
| Total | 5 | 0,146133 | | | |

CV=9,31

*(significativo)

Nota: GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; MC = media cuadrática; VF = F calculada; VP= ** significancia.

Como se muestra en la tabla 45, los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al indicador para acumulación de cromo total analizadas en la biomasa de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, permiten observar que la diferencia de medias entre los tratamientos considerados es significativo. El coeficiente de variabilidad de 9,31 % es medio bajo para la condición del experimento.

Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula (Ho) y aceptamos la hipótesis alterna (Ha).

Tabla 46

Prueba de Tukey para acumulación de cromo total en la biomasa de Lupinus cuzcensis C.P. Sm

| Tratamientos | N | Media | Agrupación |
|--------------|---|--------|------------|
| 1 | 2 | 2,0000 | a |
| 2 | 2 | 1,8800 | a |
| 3 | 2 | 1,6300 | b |

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

En la tabla 46, se muestra los resultados de la prueba de Tukey acumulación de cromo total analizadas en la biomasa de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, se muestran que los tratamientos tuvieron mayor influencia fueron en T1 con una media de 2,00 % concentración de cromo, T2 con un promedio de 1,88 % y último lugar T3 con un promedio de 1,63 %. Cuando se combina los tratamientos estadísticamente son muy diferentes.

Con estos resultados se demuestra que, en los 3 tratamiento hubo diferencias importantes en la acumulación de cromo total. En condiciones de los tratamientos, los resultados son aceptables para análisis de remoción de los metales pesados.

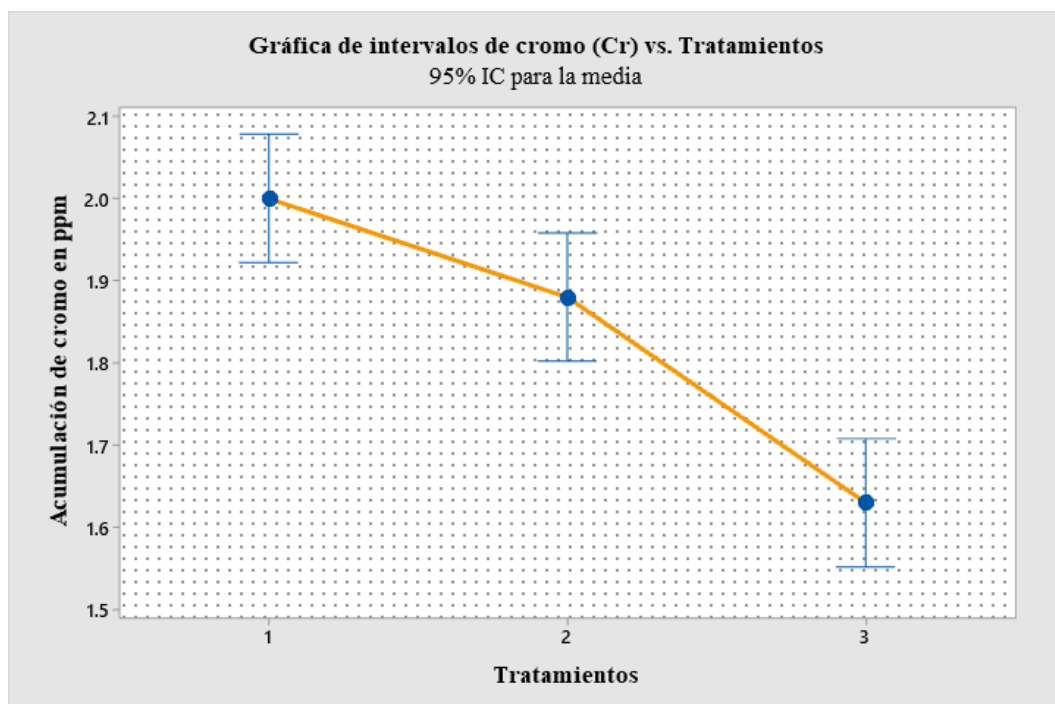


Figura 23. Media para acumulación de cromo a los 12 meses del tratamiento

En la figura 23, se observa que el tratamiento T1(100 % suelo control) obtiene el mayor % de concentración de cromo total al término del tratamiento, seguido del tratamiento T2 (80% suelos control y 20% suelo contaminado), y quedando en el último lugar el tratamiento T3 (50% suelo control y 50% suelo contaminado).

4.2 Contrastación de hipótesis

4.2.1 Hipótesis general

Luego de realizar la parte experimental y análisis de los resultados obtenidos podemos atestiguar que la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm tiene capacidad fitorremediadora, debido a su considerable acumulación de metales pesados en la biomasa de la especie, y al mismo modo tiene la gran capacidad de propagación de la especie en suelos contaminados por metales pesados, en la puna del departamento de Moquegua.

4.2.2 Hipótesis derivadas

Se determinaron la capacidad de propagación de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm en suelos contaminados con metales pesados, de los cuales, se pudo comprobar que, al menos en uno de los tratamientos si tiene capacidad de propagación en suelos contaminados por metales pesados.

Se evaluó la capacidad de remoción de metales pesados, de los cuales, se pudo determinar que al menos en uno de los tratamientos, no tuvo respuesta estadísticamente significativa en la remoción metales pesados, al término del tratamiento con la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm.

Se determinó que la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm tiene capacidad de acumulación de metales pesados como el cadmio, plomo y cromo, de los cuales, permitió determinar que las concentraciones de metales pesados en la biomasa de la especie son significativas.

4.2.3 Hipótesis estadística

Luego de realizar el análisis estadístico a través del análisis de varianza para comprobar la propagación, remoción y acumulación a los 12 meses del tratamiento de suelos contaminados por metales pesados, se pudo evidenciar diferencia significativa entre los tratamientos (T1, T2, T3), por lo que podemos aceptar la hipótesis alterna con un nivel de confianza del 95 % de que al menos uno de los tratamientos presenta diferencia estadística, y que podemos determinar que es medianamente bueno la capacidad fitorremediadora que posee de la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm.

4.3 Discusión de resultados

En relación a resultados generales todas las variables de respuesta en la aplicación de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm en sustratos bajo condiciones de invernadero incrementó significativamente en la propagación de esta especie como altura, número de hojas, número de brotes, % prendimiento de la especie *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm a los 12 meses, los tratamientos propuesto tuvieron un comportamiento propio de uno del otro, destacando la absorción de metales pesados como el cadmio, plomo, y cromo, las respuestas son aceptables, conforme a los resultados obtenidos se menciona que se pudo obtener resultado de extracción de plomo 8,08 ppm del T1, 6,96 ppm del T2, y 7,24 ppm del T3. También extracción considerable de cadmio 0,89 ppm en T1, 1,00 ppm en T2, y 1,04 ppm en T3. De igual manera la extracción de cromo 2,00 ppm en T1, 1,88 ppm en T2, y 1,63 ppm en T3. Bajo estos resultados, es factible la aplicación, esto con el objetivo de restauración de suelos contaminados por metales pesados.

Jara et al. (2014) La producción de biomasa disminuyó significativamente en *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⁻¹ MS y 1024,2 mg de zinc kg⁻¹ MS. En las raíces de *Lupinus ballianus* fue obtenida la más alta acumulación de cadmio, con una concentración de 287,3 mg kg⁻¹ MS con el tratamiento de 100% de relave de mina.

Suaña (2017) La concentración promedio de cadmio en el suelo del invernadero presentó un valor promedio de 24,36 mg/kg, en la intemperie se

determinó 21,76 mg/kg, no existiendo diferencia estadística entre ambos ambientes de cultivo ($p=0,112$). En los órganos de la especie vegetal, la concentración de cadmio ambiente exterior se obtuvo en hoja una media de 0,21 mg/kg, en raíz 0,88 y tallo 0,29 en ambiente interior hoja 0,29 mg/kg, raíz con 1,80 y tallo 0,27, siendo estadísticamente superior el contenido en la raíz ($p<0,05$). La raíz de plantas de girasol presenta una media de absorción de cadmio de 5,716 %, tallo con 1,217 % y hojas 0,529 % de absorción; encontrando mayor absorción del cadmio, se produce a nivel radicular de la especie girasol.

Díaz y Sierra (2017) Determina que la especie de plantas vegetales se cultivaron durante 158 días y se realizó toma de muestras a los 60, 102 y 158 días. Como resultado del estudio, indica que durante los primeros 60 días las plantas acumularon un mayor porcentaje de metales y en las muestras colectadas a los 102 días, se encontró que para *Lupinus pubescens Benth* las concentraciones máximas acumuladas de cada metal fueron: 2015,5 mg/kg de cadmio, 72,2 mg/kg de plomo, y 0,16 mg/kg de mercurio, mientras que para *Artemisia absinthium* fueron: 13024,9 mg/kg de cadmio, 98,7 mg/kg de plomo y 0,12 mg/kg de mercurio. En la investigación concluye que las especies evaluadas tienen un alto potencial de fitoacumulación de metales pesados y considera que son una alternativa para la descontaminación de ecosistemas estratégicos.

Jara (2018) Las semillas con escarificación mecánica de lijado de la testa e inducidas en oscuridad, permitió una alta germinación de *Lupinus ballianus L. condensiflorus* y *Astragalus garbancillo*. Por lo tanto, las semillas escarificadas favorecieron la emergencia de plántulas en el sustrato, y la mayor emergencia de plántulas se obtuvo en *Astragalus garbancillo*. La longitud de planta, el número de

hojas y la producción de biomasa en las tres especies disminuyeron significativamente con el tratamiento de 100% de relave de mina. Los mayores valores de acumulación de cadmio total, plomo total, zinc total; y el contenido de estos metales en las raíces de *Lupinus ballianus*, *L. condensiflorus* y en *Astragalus garbancillo*, fueron obtenidos con el tratamiento de 100% de relave de mina. El factor de bioconcentración de cadmio en las tres especies fue > 1 . Pero, el factor de bioconcentración y de transferencia de plomo y zinc en las tres especies fue < 1 , en conclusión, las tres especies son fitoestabilizadores de metales pesados.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Primera. Se evaluó la Capacidad fitorremediadora de la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm en condición de invernadero, ha sido altamente positivo en presente trabajo de investigación. Por la capacidad de que, la especie *L. cuzcensis* puede tolerar y fitoacumular los metales pesados. Por consiguiente, con un sistema de tratamiento apropiado, se podría restaurar grandes áreas de suelo contaminado por metales pesados (in-situ).

Segunda. Según la determinación de la capacidad de propagación de *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, se concluyó que la especie puede tolerar y coexistir con los metales pesados, y también puede propagarse con suma facilidad en condiciones de alta concentraciones de metales pesados, al mismo modo puede acumular en su tejido foliar, metales como el plomo, cadmio, cromo y otros elementos.

Tercera. Según la evaluación capacidad de remoción de metales pesados, al término del sistema de tratamientos con la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, se concluyó que, en la presente investigación, se pudo determinar que la remoción de metales como el cadmio (Cd), cromo (Cr), y plomo (Pb) es mínima en comparación de un antes y un después del tratamiento, y la concentración de los metales pesados está debajo de los valores establecidos por el estándar de calidad ambiental (ECA) que se requiere analizar.

Cuarta. Se analizaron la acumulación de metales pesados en la especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, se concluyó que la especie tiene capacidad de acumulación de metales pesados como el cadmio (Cd), plomo (Pb) y cromo (Cr) en la biomasa de la especie. Esto demuestra que esta especie nativa de la zona, es una alternativa recomendable para remediar suelos contaminados por metales pesados.

5.2 Recomendaciones

Primera. Se recomienda selección semillas apropiadas y de calidad para el sembrío, ya que por esto dependerá el brote rápido y eficaz para el tratamiento.

Segunda. Se sugiere utilizar macetas más grandes para el crecimiento apropiado de esta especie, ya que suele propagarse rápidamente en condiciones óptimos, así mismo necesita enraizar en un espacio adecuado. Esto con el objetivo de una remediación de suelo óptimo.

Tercera. Se recomienda análisis de campo de los suelos, que contengan una concentración alta de metales pesados. Los metales pueden condicionar en el crecimiento de las plantas vegetales, porque son tóxicos para seres vivos, y las plántulas en su etapa de crecimiento necesitan materia orgánica, y también fertilizante controlado. Esto con la finalidad de optimizar los tratamientos para una investigación.

Cuarta. Se propone realizar tratamiento con esta especie botánica *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm, en suelos contaminado (in situ) de un área con contenido de metales pesados.

Quinta. Se recomienda tener cuidado en el manejo de las muestras de suelo y planta vegetal, ya que de esto dependerá obtención de resultados verídicos. También coordinar con un laboratorio acreditado, que cumplan los requisitos propios para análisis de suelo y concentración de metales pesados en un tejido foliar.

Sexta. Se sugiere continuar con la investigación con bases confiables, y artículos científicos extranjeras, por la veracidad de las investigaciones. También por el avance en la investigación de este tema de fitorremediación, y por diversidad de estudios publicados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkorta, I., Becerril, J., & Garbisu, C. (2010). Phytostabilization of Metal Contaminated Soils. *Reviews on Environmental Health*, 25, 135–146. Recuperado de <https://www.degruyter.com/view/j/reveh.2010.25.2/reveh.2010.25.2.135/reveh.2010.25.2.135.xml>
- Alkorta, I., Hernández Allica, J., Becerril, J., Amezaga, I., Albizu, I., & Garbisu, C. (2004). Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 3, 71–90. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.578.7899&rep=rep1&type=pdf>
- Alloway, B. (1995). *Heavy Metals in Soils* (2 ed.). Glasgow, Reino Unido: Chapman & Hall. Recuperado de <http://www.springer.com/in/book/9789401045865>
- Audesirk, T., Audesirk, G., & Byers, B. E. (2008). *Biología: La vida en la tierra* (Octava ed.). México: Pearson Educación de México. Recuperado de <https://labibliotecadelaescuela.files.wordpress.com/2014/10/audesirk-teresa-biologia-la-vida-en-la-tierra.pdf>
- Baldeón, S., Flores, M., & Roque, J. (2006). Fabaceae endemic of Peru. *Rev. peru biol.*, 13. Recuperado de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1727-99332006000200055&script=sci_arttext
- Balvín, D. D. (1995). *Agua, minería y contaminación: El caso de Southern Perú* (Ediciones Labor ed.). Ilo, Perú. Recuperado de <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/handle/10625/14244>
- Balvín, D. D. (2006). *Environmental Regulation of Mine Waters in South America*. Lima. Recuperado de <http://www.labor.org.pe/webermisa/images/>

ERMISA%20D1.pdf

Barceló, J., & Poschenrieder, C. (2003). Phytoremediation: Principles and perspectives. *Contributions to Science*, 2, 333-344. Recuperado de <http://www.raco.cat/index.php/Contributions/article/viewFile/264297/351950>

Bautista, F. S. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados* (Vol. 1). Yucatan, Mexico: Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán Mérida. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=yE2Jq3z7ex4C&printsec=frontcover&dq=contaminacion+de+suelos&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwitnebjl-zYAhVBt1MKHc3dAvAQ6AEILzAC#v=onepage&q=contaminacion%20de%20suelos&f=false>

Blaylock, M., & Huang, J. (1999). *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment*. (E. Raskin, Ed.) New York, Estados Unidos. Recuperado de <http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471192546.html>

Capurro, V. F. (2011). Conflictos socio ambientales, una tarea pendiente en el Perú. *Advocatus*, 25, 109-115. Recuperado de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/biblioteca/Biblio_con.nsf/999a45849237d86c052577920082c0c3/8EAE249B7C4A053B05257D5D007167BE/\\$FILE/ADVOCATUS.PDF](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/biblioteca/Biblio_con.nsf/999a45849237d86c052577920082c0c3/8EAE249B7C4A053B05257D5D007167BE/$FILE/ADVOCATUS.PDF)

Dary, M., Pérez, C., Palomares, A., & Pajuelo, E. (2010). "In situ" phytostabilisation of heavy metal polluted soils using *Lupinus luteus*. *Journal of Hazardous Materials* 177, 323–330. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409020068>

- Delgadillo, A. G., Prieto, C., Villagómez, F., & J. Acevedo, O. (2011). Fitorremedición: Una Alternativa para Eliminar la Contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 597- 612. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002
- Díaz, J., Guzmán, P., & Jaime, E. (2011). *Ingeniería ambiental* (Primera ed.). México: Alfaomega Grupo Editor, S.A.de C.V. Recuperado de <http://www.alfaomega.com.co/ingenieria-ambiental-1474.html>
- Díaz, S., & Sierra, C. (2017). *Fitorremediación con artemisia Absinthium y Lupinus pubescens benth. Como alternativa para la descontaminación de ecosistemas andinos y altoandinos amenazados por metales pesados* (Tesis de maestría). Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá. Recuperado de <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/2397>
- Diez, L. J. (2008). *Fiotocorrección de suelos contaminados con metales pesados: Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas* (Tesis doctoral). Universidad de Santiago de Compostela, Galicia, España. Recuperado de https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/2540/9788498872026_content.pdf;jsessionid=254FD058822012175F1F73493E95FD26?sequence=1
- Doble, M., & Kumar, A. (2005). *Biotratment of industrial Effluents* (1 ed.). Chennai, India: Elsevier Butterworth-Heinemann. Recuperado de <https://www.amazon.com/Biotreatment-Industrial-Effluents-Mukesh-Doble/dp/0750678380>

- Feyen, J. C. (2015). Mining from a conflicting to a collaborative activity: Review of literature. *Maskana*, 6, 79-87. Recuperado de <https://publicaciones.uca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/490/414>
- Food and Agriculture Organization(FAO). (2012). *Guía para la construcción de invernaderos o fitotoldos*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/as968s.pdf>
- Ghosh, M., & Singh, S. (2005). *A review of phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts*. (Vol. 1). Applied Ecology and Environmental Research 3. Recuperado de http://www.aloki.hu/pdf/0301_001018.pdf
- Glick, B. R. (2010). Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. *Biotechnology Advances*, 28, 367-374. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975010000212?via%3Dihub>
- Hazrat, A. E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere* 91, 869–881. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653513001914>
- Inforegion. (16 de Febrero de 2018). *Moquegua: Denuncian contaminación del río Coralaque*. Recuperado de <http://www.inforegion.pe/248944/moquegua-denuncian-contaminacion-del-rio-coralaque/>
- Jara, P. (2018). *Evaluación de Lupinus condensiflorus C.P.Sm., L. ballianus C.P. Sm. y Astragalus garbancillo Cav. (Fabaceae) en la restauración de suelos que contienen plomo, cadmio y zinc* (Tesis doctoral).Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Recuperado de <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/9406>

- Jara, P., Gómez, J., & Montoya, H. (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *Revista peruana de biología* 21, 145 - 154. Recuperado de doi:http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-99332014000200004
- Kossof, D., Dubbin, W., Alfredsson, M., Edwards, S., Makclin, M., Hudson, K., & Edwards. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229-245. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292714002212>
- Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente de la Universidad Nacional Agraria la Molina. (2021). Informe de ensayo muestra de suelos (Referencia: H.R.73822), Lima, Perú.
- Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente de la Universidad Nacional Agraria la Molina. (2021). Informe de ensayo tejidos vegetales (Referencia: H.R. 73823), Lima, Perú.
- Lambert, M. L. (2000). *New Methods of Cleaning up Heavy Metal In Soils and water*. Kansas, State University, Manhattan, KS. Recuperado de https://cfpub.epa.gov/ncer_abstracts/index.cfm/fuseaction/display.files/fileID/14295
- Laperche, V., Terry, J., & Logan, P. G. (1997). Effect of Apatite Amendments on Plant Uptake of Lead from Contaminated Soil. *Environmental Science and Technology*, 30, 1540–1552. Recuperado de <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es961011o>

- Lasat, M. M. (2000). *The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated Soil*. Nueva York, Estados Unidos: American Association for the Advancement of Science. Recuperado de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/9100FZE1.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>
- Lezama, P. (2010). *Las Especies de Lupinus L. (Fabaceae) y de sus simbioses en el distrito de Corongo-Ancash* (Tesis doctoral). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima – Perú. Recuperado de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/1386>
- Maqueda, G. P. (2003). *Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados* (Tesis de maestría). Universidad de las Américas Puebla, Puebla, México. Recuperado de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mbt/maqueda_g_ap/
- Marques, A., António, O., & Castro, R. &. (2009). Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils: Phytoremediation as a Potentially Promising Clean-Up. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39, 622–654. Recuperado de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643380701798272>
- Marrero, J., Amores S, I., & Coto P, O. (2012). Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento Ambiental. *ICIDCA*, 52-61. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223>

124988007

Memon, A. A. (2001). Heavy Metal Accumulation and Detoxification Mechanisms in Plants. *Turk J Bot* 25, 111-121. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/262535336_Heavy_Metal_Accumulation_and_Detoxification_Mechanisms_in_Plants

Ministerio del ambiente(MINAM). (2013). *D.S. N° 002-2013-MINAM, (ECA) para Suelo, Guía para muestreo de suelos*. Recuperado de http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf

Ministerio del Ambiente(MINAM). (2017). *D.S. N° 012-2017-MINAM, Aprueban Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados*. Recuperado de http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/12/ds_012-2017-minam.pdf

Ministerio del Ambiente(MINAM). (2017). *D.S.N° 011-2017-MINAM, Aprueban Estándares de Calidad para Suelo*. Recuperado de <http://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-suelo-0>

Mojiri, A. (2011). The Potential of Corn (*Zea mays*) for Phytoremediation of Soil Contaminated with Cadmium and Lead. *J. BIOL. ENVIRON. SCI.*, , 5, 17-22. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/225285964_The_Potential_of_Corn_Zea_mays_for_Phytoremediation_of_Soil_Contaminated_with_Cadmium_and_Lead

- Montesinos, D. (2012). Lista anotada de nuevas adiciones para la flora andina de Moquegua. *Rev. peru. biol.*(19), 307 - 316. Recuperado de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1727-99332012000300010&script=sci_abstract
- Moore, R., Clark, D., & Vodopich, D. (1997). *Botany: Plant Form and Function* (Segunda ed.). McGraw Hill. Recuperado de <https://www.nhbs.com/botany-plant-form-and-function-book>
- Nowak, A., Sylwia, N., & Opole, P. &. (2014). Vegetation of solid rock faces and fissures of the alpine and subnival zone in the Pamir Alai Mountains (Tajikistan, Middle Asia). *Phytocoenologia*, 44, 81–101. Recuperado de https://www.schweizerbart.de/papers/phyto/detail/44/82127/Vegetation_of_solid_rock_faces_and_fissures_of_the_alpine_and_subnival_zone_in_the_Pamir_Alai_Mountains_Tajikistan_Middle_Asia
- Otones, M. V. (2014). *Diagnóstico ambiental de suelos contaminados por actividades mineras y evaluación de técnicas de estabilización para su recuperación* (Tesis doctoral). Univesidad de Salamanca, Salamanca. Recuperado de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/107622/1/Diagn%C3%B3stico%20ambiental%20de%20suelo%20contaminados%20por%20actividades%20mineras%20y%20evaluaci%C3%B3n%20de%20t%C3%A9cnicas%20de%20estabilizaci%C3%B3n%20para%20su%20r.pdf>
- Padmavathiamma, P., & Li, L. (2007). Phytoremediation Technology: Hyper-Accumulation Metals in Plants. *Water, Air, and Soil Pollution*. 105-126. Recuperado de [http://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1529251](http://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1529251)

- Pilon, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Revisions in Plant Biology*(56), 15–39.
Recuperado de <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214>
- Raskin, I., Robert, D. S., & David, E. S. (1997). Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Current Opinion in Biotechnology*,8, Volume 8, Issue 2, 221–226. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958166997801061>
- Robinson, B. R. (2006). Phytoremediation for the management of metal flux. *Snow Landsc. Res*, 80, 221–234. Recuperado de <http://www.kiwiscience.com/JournalArticles/FSLR2006.pdf>
- Sepulveda, T., Velazco, J., & De la Rosa, D. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: Muestreo y alternativas para su remediación* (Primera Ed. ed.). México. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=311149>
- Sheoran, V., Sheoran, S., & Poonia, P. (2011). Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41, 168-214. Recuperado de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643380902718418>
- Singh, A. K., Ramesh, w., & P., o. (2009). *Biological remediation of soil: An overview of global market and available technologie*. Berlin,Heidelberg: Advance in Aplied Bioremediation. Recuperado de <http://www.springer.com/la/book/9783540896203#aboutBook>
- Suaña, Q. M. (2017). *Capacidad de girasol (Helianthus annus L.) para absorber cadmio de suelos contaminados en ambiente controlado -Puno* (Tesis

- doctoral).Universidad Nacional del Altiplano, Puno. Recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/6779>
- Tropicos.org. (s.f.). *Lupinus cuzcensis* C.P. Sm. (T. M. Garden, Editor) Recuperado de Tropicos.org.: <http://www.tropicos.org/Name/13010497>
- Wang, L. B., Yuehua, J., Runqing, H., & Liu. Wei, S. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, 184, 594-600. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004565351730927X>
- Wilcox, B., Wood, K., & Tromble, J. &. (1988). Description and classification of soils of the high-elevation grasslands of central Peru. *Geoderma*, 42, 79-94. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016706188900249>
- Wong, M. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with. *Chemosphere* 50, 775–780. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653502002321>
- Young, R., León, A., Cano, & Macbryde, H. (1997). *Peruvian Puna* (In S. D.Davis, V. H. Heyewood , O. Herrera Macbryde, J. VillaLobos and A.C. Hamilton ed.). Center of Plant Diversity. A Guide and Strategy for their Conservation Cambridge: IUCN.