



**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL**

## **TESIS**

**“CAPACIDAD EXTRACCIÓN DE LA ESPECIE  
Stipuichu EN LOS PASIVOS AMBIENTALES  
MINEROS EN LA PLANTA  
CONCENTRADORA DE HUARI – LA OROYA  
DE LA UNCP”**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER**

**VENEGAS CASANOVA, Carlos**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**LIMA - PERÚ**

**2016**

## **DEDICATORIA**

A dios:

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

Con eterno agradecimiento a mis padres:

Por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado y por haberme dado una excelente educación en el transcurso de mi vida.

### **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Particular Alas Peruanas la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, a la Escuela de Ingeniería Ambiental, alma mater de mi Formación Profesional.

Al Ingeniero Eduardo Robles García, docente de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

## RESUMEN

La contaminación de la zona de Huari - La Oroya, impactado por los pasivos ambientales (plomo), generado por la concentradora de Huari, perteneciente a la Universidad Nacional del Centro del Perú, es un problema que se incrementado con el paso de tiempo, con la contaminación del Rio Mantaro y que este es dispensador de agua al Valle del Mantaro. Los tratamientos físicos-químicos convencionales resultan muy caros y poco convenientes para aplicar a extensos terrenos. Por tal motivo, el estudio de plantas que se desarrollan en el área contaminada, ha surgido como alternativa interesante y económica. Las plantas vegetales presentan diversas estrategias para descontaminar el suelo, como el caso de la planta *Stipa Ichu*, planta que dio resultado con mayor efectividad en la absorción de plomo, de los que se encontraron el área de estudio. La fitorremediación tiene seis mecanismos de absorción de las cuales mi trabajo de investigación experimental solo se basa en el mecanismo de fitoextracción realizado a nivel de campo.

Los resultado obtenidos después de los análisis, dieron la clara veracidad de ser esta planta vegetal *Stipa Ichu* una acumuladora de plomo, cuyo efecto resulto absorbiendo 310,45 mg de Pb/kg de planta, del suelo.

Desde luego se puede concluir que será posible la exitosa aplicación de la fitorremediación con el mecanismo de fitoextracción en zonas contaminadas por el metal pesado (plomo).

Los valores obtenidos son los promedios de las cuatro plantas realizadas el experimento.

**PALABRAS CLAVES:** Biorremediación, fitorremediación, fitoextracción, pasivos ambientales, *Stipa Ichu*

## ABSTRACT

Contamination of the area Huari - La Oroya, impacted by environmental liabilities (lead), generated by the concentrator Huari, belonging to the National University of Central Peru is a problem that has increased over time, with Rio Mantaro pollution and water dispenser this is the Mantaro Valley. Conventional physical-chemical treatments are very expensive and inconvenient to apply to large grounds. Therefore, the study of plants that grow in the contaminated area has emerged as interesting and economical alternative. Vegetable plants have different strategies to decontaminate the soil, as the case of Stipa Ichu, plant that it worked more effectively in the absorption of lead, which the study area were found plant. Phytoremediation has six absorption mechanisms which my experimental research is only based on the mechanism of phytoextraction performed at field level.

The results obtained after the analysis, given the clear truth of being this vegetable plant Stipa Ichu an accumulator of lead, which resulted absorbing effect 310.45 mg Pb / kg of plant, soil.

Of course it can be concluded that the successful application of phytoremediation with fitoextracción mechanism in polluted by heavy metal (lead) areas will be possible.

The values are averages of the four plants made the experiment.

**KEYWORDS:** Bioremediation, phytoremediation, phytoextraction, environmental liabilities, Stipa Ichu

## INTRODUCCIÓN

Actualmente en numerosos países los metales pesados desechados por las actividades mineras y complejos metalúrgicos están causando niveles de contaminación que atentan contra el medio ambiente y la salud de las poblaciones. La contaminación es uno de los problemas ambientales más importantes que afectan a nuestro mundo y surge cuando se produce un desequilibrio, como resultado de la adición de cualquier sustancia al medio ambiente, debido a los diferentes procesos productivos del hombre (fuentes antropogénicas) y actividades de la vida diaria, causando efectos adversos en el hombre, animales y vegetales; problemática a la que el Perú no es ajeno. En nuestro país entre los principales agentes contaminantes identificados tenemos: el plomo, mercurio, aluminio, arsénico, magnesio, manganeso, hierro, cobre, cianuro. (R.M. N° R.M. N° 525-2005/MINSA). Adicionalmente a ello tenemos la presencia cada vez mayor de las poblaciones ubicadas dentro del área de influencia de las actividades productivas entre ellas la minería y el mayor conocimiento sobre el impacto ambiental y los riesgos a la salud ocasionados por los diferentes metales pesados y otras sustancias químicas. En el Perú las leyes son flexibles y el estado por lo general permisivo, inclusive hasta hace poco la legislación ambiental no establecía estándares de calidad de suelos.

La actividad minera irresponsable se ve reflejada en La Oroya, considerado uno de los distritos más contaminados del mundo, y cuyos contaminantes se han diseminado por toda la cuenca del Mantaro (Yupari, 2006). La planta concentradora Huari, ubicada en este distrito, es propiedad de la Universidad Nacional del Centro del Perú y está destinada para el servicio de tratamiento de minerales, posee pasivos ambientales fundamentalmente constituidos por relaves ubicados al pie de la planta en terrenos de la comunidad de Huari. La *Stipa ichu* es las especies de crecimiento natural más abundantes en este pasivo, además de no presentar síntomas de fitotoxicidad. Sin embargo no se dispone de estudios que confirmen su capacidad de extracción de Pb y Zn en suelos contaminados y su posible empleo en técnicas de fitorremediación para condiciones climáticas y de suelo similares.

## ÍNDICE

Dedicatoria	2
Agradecimiento	3
Resumen	4
Abstract	5
Introducción	6
Índice	7

### CAPÍTULO I

#### MARCO CONTEXTUAL

1.1.	Descripción de la Realidad Problemática	10
1.1.1.	Caracterización del problema	10
1.1.2.	Definición del Problema	12
1.2.	Formulación del Problema	12
1.2.1.	Problema General	12
1.2.2.	Problemas Específicos	12
1.3.	Objetivos de la Investigación	13
1.3.1.	Objetivo General	13
1.3.2.	Objetivos Específicos	13
1.4.	Justificación de la investigación	13
1.4.1.	Justificación Teórica	13
1.4.2.	Justificación metodológica	14
1.4.3.	Justificación Práctica	15
1.5.	Importancia	16
1.6.	Limitaciones	16

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

2.1.	Marco referencial	17
2.1.1.	Antecedentes de la investigación	17
2.1.2.	Referencias históricas	23
2.2.	Marco legal	27
2.3.	Marco conceptual	28
2.4.	Marco teórico	29
2.4.1.	Fitorremediación	29
2.4.2.	Técnicas de fitorremediación	31
2.4.3.	Respuestas típicas de las plantas frente a suelos Contaminados por metales pesados	36
2.4.4.	Tolerancia de las plantas hacia los metales pesados	39
2.4.5.	Pasivo ambiental minero	48
2.4.6.	Relaves mineros	49
2.4.7.	Metales pesados	49
2.4.8.	Suelo	58
2.4.9.	Estándares de calidad ambiental y límites máximos	63

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

3.1.	Tipo y Nivel de la Investigación	66
3.1.1.	Tipo de la Investigación	66
3.1.2.	Nivel de la Investigación	66
3.2.	Método.	66
3.3.	Diseño de la Investigación.	67
3.4.	Hipótesis de la Investigación	68



# **CAPITULO I**

## **MARCO CONTEXTUAL**

### **1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA**

#### **1.1.1. Caracterización del problema**

Los problemas ambientales asociados a minas abandonadas son conocidos e incluyen contaminación de suelos y aguas, arrastre de polvo, enormes cantidades de residuos, pérdida de biodiversidad e inestabilidad física con sus consecuencias para la seguridad de las personas.

No existen estadísticas globales sobre la escala económica del problema ni estimaciones globales de los costos de remediación.

Números disponibles se refieren a áreas restringidas, por lo general se basan en estándares disímiles y se refieren únicamente a los costos de remediación ambiental hasta un nivel aceptable.

Estas cifras muchas veces subestiman los costos reales que incluyen costos sociales, frecuentemente superiores a los costos de la remediación ambiental.

Los principales actores involucrados en los pasivos ambientales mineros son: el gobierno central, gobierno regional, gobierno local, las empresas mineras y la sociedad civil incluyendo las comunidades y ONG se aproximan al problema desde posiciones y perspectivas muy diferentes.

Todos sin embargo concuerdan que existe urgencia de actuar.

Mientras que el problema sobre estos pasivos ambientales mineros históricos que vienen mayoritariamente de explotaciones antiguas y sus consecuencias para los involucrados (contaminación, riesgo para la salud y la seguridad, pueblos abandonados y desolación socio-económica, oposición a proyectos mineros nuevos, etc.) esté claramente identificado, el gran desafío consiste en encontrar consenso sobre la forma cómo actuar, sobre quién debe asumir responsabilidades y cómo deberán financiarse las medidas de remediación y la regeneración socio-económica.

Los dos últimos temas están ligados, ya que el financiamiento normalmente deberá ser provisto por el grupo de responsables.

El proyecto PRODES (1996-2000) realizó el diagnóstico ambiental nacional que permitió detectar los problemas ambientales generados por la minería a través de los Estudios de Evaluación Ambiental Territorial (EVAT) de diversas cuencas hidrográficas y también los Inventarios de Minas inactivos en el país.

En el año 2001 se creó en el Ministerio de Energía y Minas (MEM) el “Proyecto Eliminación de Pasivos Ambientales” (EPA), para realizar estudios y obras para la rehabilitación de áreas afectadas por pasivos.

El Inventario de Minas Inactivas en diversas regiones del país ha permitido caracterizar casi el 85% de los pasivos y establecer la prioridad de atención considerando: riesgo de falla catastrófica, magnitud de población e infraestructura

afectada o en riesgo, nivel de contaminación de agua, suelo, flora y fauna, impactos en calidad de vida de población e impactos socioeconómicos.

Se identificaron también 20 sitios que requerían atención inmediata y se destacó que las cuencas de los ríos: Santa, Rímac, Llaucano y Mantaro, son los que albergan al mayor número de pasivos del país.

### **1.1.2. Definición del Problema**

Es el estudio experimental con plantas nativas para la descontaminación de pasivo ambiental minero de Huari – Oroya.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema General**

¿Cuál es la influencia de la especie *Stipa Ichu* en la extracción del plomo en los pasivos ambientales mineros en la planta concentradora de Huari de la UNCP- La Oroya?

### **1.2.2. Problema específico**

- ¿Cuál el contenido del plomo en los suelos del pasivo ambiental mineros en la planta concentradora de Huari de la UNCP- La Oroya?
- ¿Cuál es la cantidad de plomo que se ha extraído de la planta *Stipa ichu*?

### **1.3. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.3.1. Objetivo general**

¿Determinar la influencia de la especie *Stipa Ichu* en la extracción del plomo en los pasivos ambientales mineros en la planta concentradora de Huari de la UNCP - La Oroya?

#### **1.3.2. Objetivo específico**

- Determinar el contenido de plomo en los pasivos ambientales mineros en la planta concentradora de Huari de la UNCP - La Oroya.
- Determinar la cantidad de plomo que se ha extraído de la planta *Stipa ichu*.

### **1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.4.1. Justificación teórica**

En la actualidad, la situación del departamento Junín es bastante preocupante, lo cual se debe a la creciente contaminación causada por los relaves mineros.

Esto se debe a que, en esta zona del país, existen gran cantidad de minas en actividad.

Pero, ¿A qué se denominan relaves mineros? Son los desechos que resultan del lavado de minerales, los cuales contienen sustancias tóxicas como el plomo, arsénico, cadmio, cianuro, mercurio y selenio, que, al tener contacto con el agua y el subsuelo, altera su composición natural. Esto, a su vez,

afecta a la fauna, flora y población que cuentan con estos factores para su desarrollo.

La mala infraestructura de las empresas mineras es uno de los factores determinantes para que ocurra este tipo de contaminación.

Por ejemplo, lo correcto es que cada mina tenga túneles elaborados especialmente para que estos elementos tóxicos no se filtren en el subsuelo.

Además, estos túneles deben conducir a una represa en la que se neutralicen estos desechos y no sean contaminantes.

No obstante" empresas como Ananea (mina de oro ubicada en el departamento de Puno) no se preocupan por la construcción de represas, ni la adecuada elaboración de estos túneles, es por ello que estas sustancias tóxicas están contaminando el medio ambiente de Junín.

Los efectos nocivos de los relaves mineros se deben en gran parte al incumplimiento de las leyes. Por ejemplo, una ley que censura directamente los efectos de los relaves mineros es la ley 17752, que se señala en el capítulo II,

#### **1.4.2. Justificación metodológica**

El resultado de la investigación, es producto del desarrollo de instrumentos de recolección de datos experimentales y validados mediante análisis de laboratorio de la Universidad Nacional del Centro del Perú.

De igual manera, se ha considerado necesario apoyarse en un trabajo de gabinete, el cual ha consistido en analizar información, recogida del trabajo experimental y de gabinete.

Para el caso de las variables independientes, como para las dependientes, el proceso estadístico permitió, la sumarización de cada variable, estableciendo las medidas de resumen, con la interpretación respectiva.

Para el procesamiento de la información de variables cuantitativas, se ha empleado el software estadístico Minitab en su versión 16.0.

Este tratamiento permitió precisar la presencia de determinada cantidad absorbida de plomo.

Finalmente la metodología de recolección y tratamiento de datos, fue enriquecido gracias a los valiosos aportes de expertos en la materia, que apoyaron en la realización del presente estudio.

#### **1.4.3. Justificación Práctica**

La implantación efectiva del modelo de biorremediación de pasivo ambiental de Huari-Oroya, mediante la técnica de Fito extracción con la planta *Stipa ichu*, permitirá el tratamiento de los pasivos ambientales mineros, y traerá como beneficio la descontaminación de las aguas superficiales, que en este caso desembocan en el río Mantaro y que esta es una de las fuentes principales de abastecimiento de agua para el riego del Valle del Mantaro.

## **1.5. IMPORTANCIA**

El presente modelo de Fito extracción con planta nativa *Stipa ichu* servirán para el tratamiento de pasivos ambientales mineros, ya que en el Perú se ha logrado ubicar hasta el momento cerca de siete mil pasivos ambientales mineros, que reportó el Ministerio de Energía y Minas.

Y que siendo política de este ministerio determinar los responsables que asuman su remediación, y de no dar con ellos, se encargaran directamente de la solución del problema, y que esta investigación contribuirá con el método descrito a lograr este fin, ya que la mayoría de estos pasivos ambientales mineros se encuentran la Sierra.

## **1.6. LIMITACIONES**

La limitación más importante del estudio, se dio por el lado del tiempo, para ajustar el proyecto de investigación, para lo cual se ha tenido que prescindir de importantes volúmenes de información en aras a la precisión que el tema amerita.

Por otro lado, para la investigación sólo se ha evaluado a 4 plantas del área de estudio y que cumplieran con las características planteadas.

Finalmente una limitación principal para la investigación fue el costo, por lo cual se tuvo que prescindir de emplear otras técnicas de evaluación físico química, para la determinación de la presencia de contaminantes

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. MARCO REFERENCIAL**

##### **2.1.1. Antecedentes de la investigación**

En la investigación científica “Especies nativas de suelos contaminados por metales”: aspectos eco fisiológicos y su uso en fitorremediación de la revista Ecosistemas refiere:

Las especies nativas que sobreviven en suelos contaminados con metales (metalofitas y pseudometalofitas) han desarrollado unos mecanismos fisiológicos especiales para tolerar la presencia de metales:

- i) La exclusión que impide la entrada de metales en la raíz y/o su transporte a la parte aérea de la planta,
- ii) La acumulación en la parte aérea mediante su inmovilización o compartimentación en las vacuolas.

Debido a que viven en zonas muy limitadas y pueden ser afectadas directamente por las actividades mineras su conservación deber ser prioritaria, no solo por la pérdida de una biodiversidad tan especial sino por su posible utilización en fitotecnologías ambientales de revegetación, Fito estabilización y Fito extracción de entornos contaminados con metales.

El presente estudio fue llevado a cabo con especies nativas procedentes de suelos mineros con altos niveles de Zn, Pb y Cd del Norte de España. (Beltrán, 2001)

En el estudio titulado "Tolerancia a la toxicidad de zinc, cobre y plomo en plantas silvestres asociadas a suelos contaminados por la actividad minera" se estudiaron especies como: *Jaravanutans*, *Jaravaichu* y *Jaravarufescens*, de las cuales se tomaron 2 muestras por especie. Los resultados obtenidos para el género *Jarava*, de los análisis de plantas del contenido de Pb y Zn en los tejidos, fueron para *Jaravanutans* 695,5 mg/kg y 930 mg/kg para Pb asimismo 1695 mg/kg y 1275 mg/kg para Zn; para *Jaravaichu* fueron de 496 y 416 para Pb y 780 mg/kg y 640mg/kg para Zn y finalmente para *Jaravarufescens* de 162,5 y 400 para Pb y 2235 mg/kg y 1325 mg/kg para Zn. (Espinoza, 2000).

Los resultados obtenidos de los análisis de plantas para la familia Poaceae, del contenido de Pb y Zn en los tejidos fueron para *Agrostisbreviculmis* 1405 mg/kg y 668 mg/kg para Pb asimismo 2250 mg/kg y 1470 mg/kg para Zn; para *Calamagrostis rígida* se repitieron, por lo que se tomó cuatro muestras y obtuvo 45,5mg/kg, 81 mg/kg, 92 mg/kg y 177 mg/kg para Pb y 137 mg/kg, 220 mg/kg, 235 mg/kg y 254 mg/kg para Zn y finalmente para *Calamagrostisvicunarum*, de la cual también se repitió en igual número de muestras, se obtuvo 90 mg/kg, 935 mg/kg, 1805 mg/kg y 1050 mg/kg para Pb y 510 mg/kg, 1175 mg/kg, 850 mg/kg y 515 mg/kg para Zn. (Espinoza, 2000).

Existe una gran biodiversidad de especies vegetales con potencial, probado en campo y en laboratorio, para la fitorremediación.

A la fecha, se han identificado 163 taxones de plantas, pertenecientes a 45 familias, tolerantes a los metales y capaces de crecer en concentraciones elevadas.

Entre las angiospermas se han identificado cerca de 400 hiperacumuladoras; entre las familias dominantes se encuentran: *Asteraceae*, *Brassicaceae*, *Caryophyllaceae*, *Cyperaceae*, *Cunouniaceae*, *Fabaceae*, *Flacourtiaceae*, *Lamiaceae*, *Poaceae*, *Violaceae* y *Europhobiaceae*.

De estas familias, *Brassicaceae* tiene el mayor número de taxones, 11 géneros y 87 especies, con capacidad para hiperacumular metales (Prasad y Freitas, 2003).

Las primeras plantas hiperacumuladoras caracterizadas son miembros de las familias *Brassicaceae* y *Fabaceae*.

El gran interés despertado por las plantas hiperacumuladoras, especialmente para destoxificar un ambiente contaminado, obliga también a resolver otros problemas relativos a otras disciplinas, hace hincapié en ello y destaca que, cuando se intensifique la investigación conjunta de diversos campos como botánica, fisiología vegetal, agronomía, química y genética, probablemente se inicie un brillante futuro para la fitorremediación.

El entorno de las plantas hiperacumuladoras revela la necesidad de impulsar mayores conocimientos multidisciplinarios que aumenten la rentabilidad y eficacia de dichas plantas: sus aplicaciones son interesantes en muchas áreas, y particularmente importantes en la protección del ambiente (Lasat, 2002).

En 1993 se realizaron los primeros experimentos utilizando plantas hiperacumuladoras para extraer metales de lugares contaminados (McGrath, 1993 y 2006), y desde entonces se

han descubierto muchas plantas con esta capacidad, que acumulan distintos metales.

La capacidad de absorción por parte de la planta varía según el tipo de contaminante, tipo de suelo y pH del mismo, por lo que aparece la posibilidad de adaptar la elección del cultivo al nivel y tipo de contaminación (Sierra, 2006).

La Fito extracción de metales pesados es una de las técnicas más prometedoras para su comercialización, apareciendo las primeras patentes en Japón en 1980 (Cunningham, 1995) y en USA en 1994 (Raskin, 1994).

Su aplicación se basa en el uso de plantas que poseen una capacidad natural por encima de lo usual para absorber y concentrar en sus partes aéreas determinados metales pesados (principalmente As, Cd, Co, Ni, Se o Zn) sin desarrollar síntomas de toxicidad. (Sierra, 2006).

Las plantas se utilizan para los contaminantes como metales pesados, derivados de petróleo, solventes clorados, pesticidas, compuestos radioactivos, explosivos y nutrientes en exceso.

Las Plantas pueden ser hierbas, arbustos y árboles (Dietz Schnoor, 2001; Garbisu y Alkorta, 2001; Incorvia, 2003; Ouyqng, 2002; Pitchel, 2000; Raskin, 1997; Susarla, 2002; US EPA, 1999). (Sierra, 2006).

Se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizósfera de la planta, puede llevar varios años remediar un sitio contaminado, está limitado a sitios con baja concentración de contaminantes, la biomasa de las plantas cosechadas en el

tratamiento de Fito extracción pueden ser clasificadas como residuos peligrosos, depende de las condiciones climáticas. (Cunningham, 1995; Henry, 2000; Khan, 2000; McIntyre, 2003; Raskin et al., 1997). (Diez, 2008).

El estudio de investigación: “Niveles de concentración de metales pesados en especies vegetales emergentes en el pasivo minero ambiental de Ticapampa, Catac, Huaraz, Perú” consistió en determinar las especies vegetales con mayor densidad poblacional, que acumulan metales pesados en el pasivo ambiental minero, de la unidad económicamente activa Lincuna III de Ticapampa.

Para seleccionar las especies más frecuentes y probables acumuladores de metales pesados se ha utilizado el método sistémico preferencial.

Los análisis correspondientes para la determinación de concentración de metales pesados en las plantas fueron mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica de Generación de Hidruros. Encontrándose concentración de metales pesados con mayor significancia en las siguientes especies vegetales: *Cynodondactylon* y *Juncusarcticus*. (Prieto et al., 2009)

Qurán, 2010 refiere que: Bradshaw y Mcneilly 1985 indican que el Pb y el Zn acostumbran aparecer asociados como contaminantes en los suelos afectados por extracciones mineras. Similares comentarios han sido hechos por Williamson et al., 1982, quienes señalan que suelos enriquecidos con un contenido de Zn (0,1 -10%) tienen, también, un alto contenido de Pb (0,1 - 3,2%). Según los

resultados obtenidos, las concentraciones de metales pesados en plantas procedentes de los suelos más contaminados fueron significativamente mayores que aquellas crecidas en los suelos menos contaminados.

Una situación similar ha sido descrita por Deng et al., 2006.

Con respecto a lo anterior, Ernst, 1979 sugiere que la tolerancia a los metales se desarrolla en suelos con un alto contenido de metales pesados.

Generalmente, las poblaciones de plantas procedentes de suelos contaminados son más resistentes a los metales que las poblaciones de la misma especie desarrollada en suelos normales (Baker, 1987).

El contenido de metales de todas las plantas analizadas está correlacionado con el contenido de metales en el suelo, *Senecio*sp, *Sonchus*oleraceus, *Baccharis* latifolia, *Plantago*orbignyana y *Lepidium*bipinnatifidum como acumuladoras de metales pesados en la parte aérea.

Estas especies se han agrupado dentro de las categorías de las plantas fito extractoras mediante la acumulación de metales pesados en las partes aéreas de la planta.

Las especies estudiadas tienen la capacidad de acumular cantidades considerables tanto de Pb como de Zn en su parte aérea. Bradshaw y McNeilly (1985) describieron esta habilidad que presentan las plantas de tolerar Pb y Zn como tolerancia múltiple. *Senecio*sp, *Baccharis* latifolia y *Lepidium*bipinnatifidum, también se sugieren para estudios de

fitorremediación de Pb, debido a que todas han sido capaces de acumular significativas concentraciones de este metal y lo han translucido eficientemente a la parte aérea. (Durán, 2010).

## **2.1.2. Referencia Históricas.**

### **2.1.2.1. Fitorremediación de suelos contaminados por metales.**

La Fitorremediación se define como el uso de plantas y la microbiota asociada, enmiendas de suelo y técnicas agronómicas para remover, contener o neutralizar el efecto de los contaminantes (Cunningham y Ow, 1996 y Pilon-Smits, 2005).

Se han estudiado cierto grupo de plantas por su tolerancia a concentraciones extremas de metales, tanto en suelos naturales como antropogénicos (Kidd et al., 2007), gracias a mecanismos fisiológicos para resistir, tolerar y sobrevivir en estos suelos (Whiting et al 2004).

a) **Antecedentes:** La idea de utilizar la fitorremediación en suelos fue introducida en el año 1983 (Chaney, 1983) y ganó aceptación en 1990 al tratarse de una alternativa “verde”.

Los organismos gubernamentales incluyen la fitorremediación como estrategia de limpieza para dar un mejor aprovechamiento a los fondos disponibles.

Además, empresas consultoras están incluyendo en sus paquetes tecnológicos la fitorremediación, para anunciar su participación con el medio ambiente (Pilon-Smits, 2005).

Aunque existen numerosas investigaciones en esta área (Brooks 1998), existen pocos trabajos en América del Sur (Bech et al., 1997, Bech et al., 2002 y Ginocchio y Baker 2004). Además de los numerosos programas nacionales, la Unión Europea ha financiado muchas iniciativas, involucrando 29 países y cerca de 250 grupos de investigación de los cuales un 60% se distribuyen en instituciones académicas, un 30% en investigadores de centros e institutos y un 10% en compañías privadas.

Sin embargo, estas investigaciones están enfocadas básicamente a elucidar los fundamentos de estas estrategias de remediación (fisiología, metabolismo, bioquímica, genética, etc.), mientras que hay pocas investigaciones prácticas que involucren el desarrollo de estas tecnologías a nivel experimental (Marmioli et al., 2010).

La fitorremediación es, por tanto, una de las técnicas más promisorias para remediar suelos contaminados con metales pesados (Brooks, 1998).

Sin embargo, es, aún, una tecnología incipiente, siendo el mayor problema la falta de antecedentes

y resultados, debido a la larga duración de los proyectos de fitorremediación, dependientes del crecimiento de las plantas, la actividad biológica y las condiciones climáticas.

Sin embargo, los numerosos proyectos pilotos, generarán resultados en los próximos años (Vanek et al., 2010). La fitorremediación constituye una alternativa económica para la eliminación de los contaminantes del suelo, siendo esta su principal ventaja, lo que ha generado, en los últimos 10 años, interés tanto en agencias gubernamentales como en industrias (Chaney et al., 1997).

Por ejemplo, los costos de limpieza ambiental son de 6-8 billones \$/ año en USA y de 25-50 billones \$/ año en todo el mundo, mientras que para fitorremediación bajan significativamente a 100-150 millones \$/ año en USA, representando cerca de un 0,5 % del mercado total (Pilon-Smith, 2005). Barceló y Poschenrieder (2003) señalan que el costo de las técnicas de fitorremediación, es entre 10 y 1.000 veces menor que las técnicas tradicionales.

Esta tecnología se lleva a cabo in-situ y los procesos biológicos involucrados ocupan energía solar, contribuyendo así a la relación costo-eficacia. Otras ventajas son:

- El respeto a los procesos naturales del ecosistema, preservando la superficie del suelo;

- La estabilización del suelo frente a la erosión por acción del sistema radicular de las plantas y,
- La reducción del impacto visual, (Raskin y Ensley, 2000, Llugany et al., 2007).

Sin embargo, la fitorremediación también tiene sus desventajas.

El principal inconveniente de esta técnica está relacionado con las características de las plantas, ya que deben estar capacitadas para tolerar la toxicidad de los metales, las condiciones del suelo y el clima.

Esta técnica también está limitada por la profundidad de la raíz de las plantas, que debe ser capaz de alcanzar el contaminante. Además, es un método de remediación lento si consideramos, por ejemplo, que la rehabilitación de un suelo mediante la acumulación de metales en las plantas a menudo lleva años.

Otro factor a considerar es la biodisponibilidad de los contaminantes, ya que solo una fracción de éstos está disponible.

Sin embargo, es muy importante considerar que la fitorremediación no es excluyente, de esta manera se pueden combinar con otras tecnologías (Pilon-Smits, 2005).

## **2.2. MARCO LEGAL**

Perú en el año 1973, aprobó leyes que cubrían problemas de salud, seguridad y bienestar general en las zonas mineras.

En los últimos años se ha dictado la Ley de Cierre de Minas (Ley 28090) y la Ley de Pasivos Ambientales de las Actividades Mineras (Ley 28271).

Los objetivos de estas últimas leyes son: legislar el proceso de identificación de los pasivos ambientales legados por las actividades mineras; establecer la responsabilidad de la remediación y rehabilitación de las áreas afectadas por los pasivos ambientales; y mitigar los impactos negativos de los productos mineros sobre la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad.

La legislación vigente manifiesta que los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo son aplicables a todo proyecto y actividad, cuyo desarrollo dentro del territorio nacional genere o pueda generar riesgos de contaminación del suelo en su emplazamiento y áreas de influencia.

Los ECA para Suelo son referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental, lo que incluye planes de descontaminación de suelos o similares.

El 25 de marzo de 2013, se Aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo, según el DECRETO SUPREMO N° 002-2013-MINAM, en el cual detalla su ámbito de aplicación del mencionado, definiciones, instrumentos de gestión ambiental, planes de descontaminación ambiental, análisis de muestras, etc.

Así mismo, mediante Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM,' de fecha 31 Marzo de 2014, se aprueba la Guía para el Muestreo de Suelos, Guía para la Elaboración de Planes de Descontaminación de Suelos.

## **2.3. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.3.1. Fito extracción:**

La Fito extracción consiste en la absorción de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas.

Existen variedades de plantas muy adecuadas para este uso debido que absorben gran cantidad de metales, en comparación con otras especies (Milliarum Aureum, 2004).

También llamada fitoacumulación, implica la acumulación y la translocación de metales pesados de las raíces hacia las partes de la planta fácilmente cosechables, eliminando los metales del suelo (Bech et al., 2002; Barceló y Poschenrieder, 2003; Wong, 2003; Becerril et al 2007 y Millán et al., 2007).

Esta tecnología se ha propuesto para disminuir las concentraciones tóxicas de metales de suelos contaminados, para descontaminar y restaurar la fertilidad de áreas contaminadas.

La fitoextracción mediante plantas hiperacumuladoras permite evaluar excavaciones extensivas, elevados costos o pérdidas de suelo superficial.

Para ello, el primer paso es seleccionar adecuadamente las plantas según los metales que se encuentren presentes así como las características del emplazamiento.

Una vez que se ha producido el desarrollo vegetativo de la planta, se corta y se procede a su incineración, trasladando las cenizas a un vertedero de seguridad.

La ventaja de la fitoextracción es que el proceso se puede repetir de forma ilimitada hasta que se consiga una concentración de contaminante en el medio aceptable dentro de los límites considerados.

Algunas de las plantas utilizadas en este método de fitorremediación son, entre otras, *Thlaspi caerulescens* para el cadmio, *Vertiveria zizanioides* para el zinc, el cadmio y el plomo y *Pistia stratiotes* para arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo y zinc (P. De la Vega, 2014).

## **2.4. MARCO TEÓRICO**

### **2.4.1. Fitorremediación**

La fitorremediación es el uso de plantas para recuperar suelos contaminados, es una tecnología in situ no destructiva y de bajo costo y está basada en la estimulación de microorganismos degradadores. (Merkl, 2004). Consiste en el uso de plantas, sus microorganismos o enzimas asociadas, así como de la aplicación de técnicas agronómicas para degradar, retener o reducir a niveles inofensivos los contaminantes ambientales a través de procesos que logran recuperar la matriz o estabilizar al contaminante.

Dentro de las técnicas de restauración de suelos afectados por la contaminación, la fitorremediación ha adquirido auge por ser un procedimiento pasivo, estéticamente agradable, útil para remediar simultáneamente una gran variedad de contaminantes (Frick, 1999).

El concepto de usar plantas para limpiar suelos contaminados no es nuevo, desde hace 300 años las plantas fueron propuestas para el uso en el tratamiento de aguas residuales.

En Rusia en los años sesenta se realizaron investigaciones utilizando plantas para recuperar suelos contaminados con radionucleótidos.

En estudios recientes se ha demostrado que la fitorremediación es una solución prometedora para la limpieza de sitios contaminados por una variedad de metales, aunque también tiene una serie de limitaciones (Singh, 2003), además, es un proceso de descontaminación que involucra el empleo de plantas que pueden remover, transferir, estabilizar, descomponer y/o degradar contaminantes de suelo, sedimentos y agua, como solventes, plaguicidas, hidrocarburos poliaromáticos, metales pesados, explosivos, elementos radiactivos, fertilizantes, para hacerlos más biodisponibles para la planta (McGrath, 2001).

La fitorremediación aplicada a suelos contaminados con elementos o compuestos inorgánicos, incluye, básicamente, tres mecanismos: la Fito extracción o Fito acumulación, la Fito estabilización y la Fito volatilización (Singh, 2003; Prasad y Freitas, 2003).

## **2.4.2. Técnicas de fitorremediación**

### **2.4.2.1. Fito transformación:**

Es el uso de plantas para la transformación de compuestos orgánicos (Macek, 2006).

Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (principalmente, la parte aérea). Usada principalmente para remediar metales y otros tóxicos inorgánicos (Se, As, radionucleídos).

Características deseables en la planta:

- Debe tolerar y acumular altas concentraciones de metales en las partes cosechables
- Debe tener una alta tasa de crecimiento.
- Debe producir un gran volumen de biomasa
- Capacidad de traslocación
- Sistema radical muy desarrollado
- Tolerancia a patógenos y herbívoros
- Fácil cultivo y cosecha
- Síntesis de quelantes

### **2.4.2.2. Fito estimulación:**

Representa la estimulación de la degradación microbiana mediante el efecto de exudados de plantas (Pilon-Smith, 2005; Macek, 2006).

Las raíces secretan exudados (enzimas y ácidos orgánicos, entre otros) que estimulan el crecimiento de diversas bacterias y hongos en la rizósfera.

Estos microorganismos pueden tener diversas características biorremediadoras.

#### **2.4.2.3. Rizo filtración:**

Es la explotación de las raíces de la planta para absorber contaminantes, especialmente metales, del agua. (Dushenkov, 1995; Macek, 2006).

Se define como la degradación de contaminantes en la rizósfera. Está emergiendo como uno de los mecanismos más efectivos por el cual las plantas pueden remediar los contaminantes orgánicos, particularmente aquellos recalcitrantes.

En ese caso se dan interacciones complejas entre exudados de raíces y de microorganismos y el suelo de la rizósfera, resultando en la formación de compuestos no tóxicos o menos tóxicos.

Se emplea en el tratamiento de contaminaciones por:

- Metales ( $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ )
- Radioisótopos ( $^{137}Cd$ ,  $^{90}Sr$ , U)
- Compuestos orgánicos hidrofílicos.

- **Características deseables en la planta:**

- Debe tener raíces de crecimiento rápido y ramificación abundante.
- Debe poder remover metales tóxicos por períodos prolongados.
- No debe ser un translocador eficiente al tallo.

#### **2.4.2.4. Fito volatilización.**

Es la absorción y transferencia de algunos contaminantes en la fase de gas por las plantas (Pilon-Smith, 2005; Macek, 2006).

Cuando los árboles absorben agua contaminada con compuestos orgánicos volátiles, eliminan la gran mayoría del COV en la evotranspiración de las hojas.

Los álamos transpiran aproximadamente el 90% del TCE que absorben.

El resultado neto de este proceso es, el que los árboles transfieren a la atmósfera el TCE que se encuentra en el acuífero.

#### **2.4.2.5. Fito estabilización.**

Es el uso de plantas para reducir la movilidad y la disponibilidad de los contaminantes en el medio ambiente (Pilon-Smith, 2005; Wei et al., 2005; Macek et al, 2006).

Empleada en el tratamiento de contaminación por:  
Metales ( $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $As^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Se^{2+}$ , U)  
Compuestos orgánicos hidrofóbicos: hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), bifenilos policlorados (PCBs), dioxinas, furanos, pentaclorofenol, DDT, dieldrina.

Características deseables en la planta

- Debe tolerar altos niveles de metales tóxicos
- Debe inmovilizar los metales vía captura y posterior precipitación y reducción
- Debe acumular bajas concentraciones en las raíces

Plantas típicas empleadas en fitoestabilización:

- Árboles freatrófitos que transpiren grandes volúmenes de H<sub>2</sub>O
- Pastos con raíces fibrosas que estabilicen la erosión del suelo
- Plantas con sistemas radiculares robustos capaces de absorber/unir contaminantes.

#### **2.4.2.6 Fito extracción:**

También llamada Fito acumulación, implica la acumulación y la translocación de metales pesados de las raíces hacia las partes de la planta fácilmente cosechables, eliminando los metales del suelo (Bech et al., 2002; Barceló y Poschenrieder, 2003; Wong, 2003; Becerril et al. 2007 y Millán et al., 2007).

Esta tecnología se ha propuesto para disminuir las concentraciones tóxicas de metales de suelos contaminados, para descontaminar y restaurar la fertilidad de áreas contaminadas.

La Fito extracción mediante plantas hiperacumuladoras permite evaluar excavaciones extensivas, elevados costos o pérdidas de suelo superficial.

La Fito extracción o Fito acumulación emplea la capacidad de las plantas para absorber y extraer el contaminante del suelo, principalmente metales, y acumularlo en sus tallos y hojas.

Las partes de las plantas donde se acumula el contaminante pueden ser extraídas y destruidas o recicladas, retirando el metal del suelo (Kumar, 1995; Salt, 1998; Saxena, 1999).

Para considerar viable el proceso es importante que la acumulación del contaminante tenga lugar en la parte aérea de la planta, fácilmente cosechable, aunque algunos autores consideraron la extracción de las raíces como una opción también viable en algunos casos (Entry, 1996; Dickinson y Pulford, 2005).

Existen plantas que presentan una acumulación extrema de metales en sus tejidos aéreos, que se conocen como plantas hiperacumuladoras (Brooks, 1998), y que son preferentemente utilizadas en este tipo de técnicas.

Debe considerarse como una tecnología de largo plazo, que puede requerir de varios ciclos de cultivo para reducir la concentración de los contaminantes a niveles aceptables. El tiempo requerido depende de la concentración y tipo de contaminante, de la duración del periodo de crecimiento y de la eficiencia de remoción de la especie utilizada y puede tomar entre uno y 20 años (Prasad y Freitas, 2003).

Entre las metodologías de limpieza para suelos contaminados por metales pesados, la técnica de Fito extracción a través de los tejidos de las plantas, presenta ventajas ecológicas y económicas. Esta opción de limpieza depende principalmente, de las condiciones del suelo y de la planta acumuladora (Pulfort y Watson, 1993).

#### **2.4.3. Respuestas típicas de las plantas frente a suelos contaminados por metales pesados.**

Según Reeves (2006) la propia inmovilidad de las plantas les obliga a desarrollar estrategias muy precisas para sobrevivir en los suelos con altos niveles de metales.

La mayor parte de las especies que toleran la presencia de metales son especies que impiden su entrada en la raíz y su transporte a los tejidos y fotosintéticos, son las especies exclusoras.

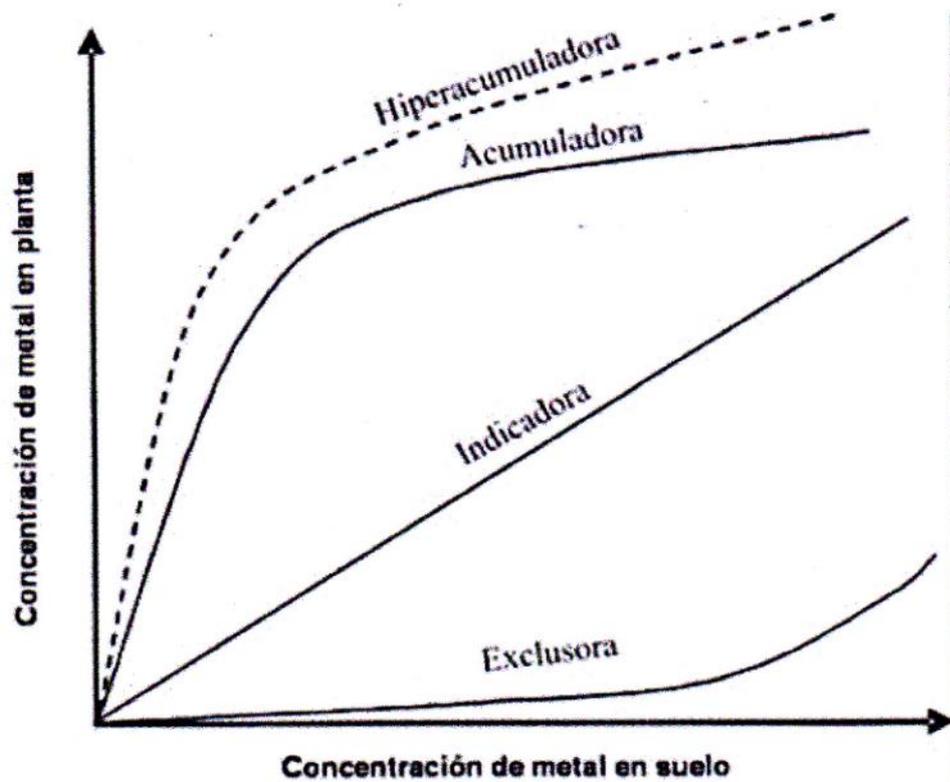
De acuerdo a Brooks (1998), su concentración final en los tejidos aéreos depende del metal y de la especie, llegando a superar el 2% de su peso seco. (Galán, 2008)

Muchas especies toleran las elevadas concentraciones de metales en el suelo porque restringen su absorción y/o translocación hacia las hojas, lo que les permite mantener concentraciones constantes y relativamente bajas en la biomasa aérea independientemente de la concentración metálica del suelo en un intervalo amplio (estrategia de exclusión según Baker, 1981). Sin embargo, otras absorben los metales activamente a partir del suelo y los acumulan en

formas no tóxicas en su biomasa aérea (estrategia acumuladora).

### Gráfico N° 1.

Respuestas típicas de las plantas frente a la presencia de metales pesados en el suelo. (Kidd et al., 2007).



Una respuesta intermedia es la que presentan las plantas indicadoras, cuya concentración metálica refleja la del suelo (Baker, 1981).

Entre las acumuladoras se han reconocido diferentes grados de acumulación metálica, desde pequeñas elevaciones sobre el nivel de fondo hasta concentraciones excepcionalmente elevadas de metales pesados como Ni, Zn y Co en su biomasa aérea sin mostrar ningún síntoma visible de toxicidad (Brooks., 1977).

#### **2.4.3.1. Hiperacumulacion:**

El término “hiperacumuladora” fue acuñado para referirse a plantas desarrolladas en campo capaces de absorber metales pesados de materia seca en algún tejido de su biomasa aérea (Brooks et al., 1977).

De forma general, las hiperacumuladoras alcanzan concentraciones de metales en hojas entre 10 y 100 veces las concentraciones “normales” (Chaney et al., 2000).

Actualmente se utiliza el término hiperacumuladora de metales para designar plantas que acumulan >10.000 mg/kg de Mn y Zn, >1.000 mg/kg de Co, Cu, Pb, Ni, As y >100 mg/kg de Cd.

Las plantas hiperacumuladoras son capaces de acumular cantidades significativas de metales pesados en su parte aérea, la cual posteriormente ha de ser cosechada y tratada como un desecho contaminado (Cunningham et al., 1996).

Estas plantas son especies muy raras de encontrar en la naturaleza, ya que crecen y generalmente en los sitios ricos en metales pesados con un limitado rango de distribución y muy vulnerables a la extinción. (Ginocchio y Baker, 2004; Becerril et al., 2007).

#### **2.4.4. Tolerancia de las plantas hacia los metales pesados**

La tolerancia hacia los metales pesados está representada por la habilidad de sobrevivir en un suelo que es tóxico para otras plantas, y se manifiesta mediante una interacción entre el genotipo y su ambiente (Macnair et al. 2002), lo cual determina su sobrevivencia (Kuiper, 1984).

Los mecanismos de tolerancia son en gran parte internos: los metales son absorbidos por plantas crecidas en sustrato metalífero, presentando una serie de adaptaciones fisiológicas y bioquímicas desarrolladas en varios grados para diferentes metales en diferentes especies y poblaciones (Baker, 1987).

También ha sido objeto de debate si es más importante, para una eficiente hiperacumulación, que las plantas tengan una alta capacidad de tolerancia de metales pesados, o que tengan una elevada capacidad de producir biomasa (Chaney et al., 1995; Cunningham et al., 1995 y Salt et al., 1996).

Aunque Chaney (1997) señalan que la habilidad de tolerar o hiperacumular metales es un factor de mayor importancia que una alta producción de biomasa, ya que una planta con alta capacidad de producción de biomasa, sometida a altas concentraciones de metales pesados disminuye significativamente su rendimiento, no así las plantas con altas capacidad de resistencia.

White et al., (2006) y Angle et al., (2001) señala que el momento de máxima acumulación metálica en la biomasa aérea frecuentemente se da en el estado de media floración, con lo cual se debe cosechar a ese estado.

Otro factor importante a considerar es el uso de plantas indígenas o nativas, que son particularmente valiosas en climas extremos, ya que la selección natural les otorga adaptaciones para mejorar la supervivencia y son muy útiles en las técnicas de fito remediación.

Lambinon y Auquier ' (1963) propusieron la clasificación de los taxones encontrados en suelos contaminados como plantas metalófitas, pseudometalófitas y metalofitas accidentales.

Las plantas metalófitas son especies de plantas que han desarrollado mecanismos fisiológicos para resistir, tolerar y sobrevivir en suelos con alto nivel de metales (Becerril et al., 2007). Son plantas encontradas solo en suelos con altas concentraciones de metales pesados; y por tanto, son endémicas de zonas con afloramientos naturales de minerales metálicos.

Tienen una distribución geográfica muy limitada y en algunos casos han sido recolectadas en pocas ocasiones (Ginocchio y Baker 2004; Becerril et al., 2007).

Esta restricción geográfica es un factor clave en su elevado nivel de extinción o disminución de la población, particularmente cuando se desarrolla la minería; perdiéndose la biodiversidad de estas especies y/o genotipos (ecotipos) que han tardado cientos, miles o millones de años en desarrollar mecanismos de subsistencia en este tipo de suelos (Ginocchio y Baker, 2004).

#### **2.4.4.1. Especificidad de la tolerancia a los metales**

Se ha demostrado en numerosos estudios que existe una gran diferencia en la absorción de metales de las diferentes especies de plantas, y también entre genotipos de especies (Brooks, 1998; Prasad, 1997 y Prasad y Hagemeyer, 1999).

Sin embargo, a la hora de elegir las especies determinadas para un sitio, es muy importante incluir las especies que crecen a nivel local o muy cerca del sitio, las cuales son competitivas en virtud de las condiciones locales y toleran más eficientemente la toxicidad del contaminante (Ginocchio y Baker 2004).

La tolerancia es un factor genéticamente estable y de carácter heredable. Según Williamson (1982) de esta manera, las semillas de plantas específicas pueden ser usadas sin perder su habilidad. (Durán, 2010)

##### **A) Tolerancia múltiple**

La tolerancia es específica hacia un metal en particular y esta habilidad no siempre confiere una tolerancia significativa hacia otros metales (Williamson, 1982).

Sin embargo existen algunas excepciones, debido a que las plantas también colonizan los suelos multicontaminados y de la misma forma que hay poblaciones tolerantes a un único metal, también existen poblaciones resistencia a dos metales,

como por ejemplo, Pb y Zn o Cu y Pb (Bradshaw y McNeilly, 1985); o bien, a más de dos metales presentes a concentraciones potencialmente tóxicas.

Este fenómeno es llamado de múltiple tolerancia y ha sido bien documentada desde Gregory y Bradshaw (1965).

La co-tolerancia, mediante el cual la tolerancia hacia un metal confiere algún grado de tolerancia a otro, ha sido menos documentada (Baker; 1987).

## **B) Estrategia de la tolerancia hacia los metales pesados**

Baker (1981) sugirió tres estrategias básicas de tolerancia a los metales:

### - Metal exclusión

En que el metal absorbido y transportado es restringido principalmente en las vacuolas de las raíces, o en la rizósfera, restringiendo su translocación hacia los tallos (Baker, 1981 y Kabata-Pendias y Pendías, 2000).

Las plantas con mecanismos de metal resistencia basadas en la exclusión son denominadas exclusoras y pueden ser eficientes para tecnologías de fito estabilización (Barceló y Poschenrieder, 2003; Whiting et al 2004 y Becerril et al., 2007).

La exclusión es la estrategia de tolerancia más característica de especies sensibles a los metales (Llugany, 2007).

- Metal acumulación

En que no hay restricción y los metales son acumulados en formas no nocivas para la planta, ya sea mediante un ligamiento con células de la pared, almacenamiento de los iones al interior de la vacuola, complejación por ácidos orgánicos y posiblemente por proteínas ligadoras de metales específicos y otras propiedades como adaptaciones enzimáticas y efectos en la permeabilidad de la membrana (Baker, 1981).

Las plantas con mecanismos de metal-acumulación son denominadas acumuladoras y son las especies más comunes en los suelos contaminados (Llugany et al., 2007).

Dentro de este grupo existen muchas especies de las familias Brassicaceae y Compositae (Tlustos et al., 2006)

Las especies que presentan mecanismos altamente especializados les permiten acumular metales en su parte aérea, hasta alcanzar concentraciones superiores al 2% de su peso seco (Brooks, 1998, Ginocchio, R. y Baker, A., 2004), superando así en 10 a 100

veces los valores normales de metales acumulados (Baker 1981 y Chaney et al., 2000) son denominadas hiperacumuladoras (Kidd et al., 2007). Actualmente se utiliza el término hiperacumuladora de metales para designar plantas que acumulan más de: 100 mg/kg de Cd (0,01%PS), 1000 mg/kg de Al, As, Co, Cu, Pb, Ni y Se (0,1% PS) y más de 10000 mg/kg de Zn y Mn (1 % PS), (Baker et al., 1994, Kabata-Pendias, 2000, Kidd et al. 2007).

En el caso de Zn y Mn algunos autores piensan que es demasiado restrictivo y consideran que se podría utilizar un valor de 3000 mg/kg.

- Metal indicación

Son plantas que reflejan el contenido de metales en el suelo o el aire (Kabata-Pendias y Pendías, 2000).

A este grupo pertenecen la mayoría de las plantas agrícolas, ejemplo: trigo, avena, maíz. (Tlustos et al., 2006). Además de musgos y líquenes, conocidos como los indicadores más sensibles de contaminación atmosférica, muchos otros órganos de plantas han mostrado ser buenos indicadores de contaminación de suelo y ambientes acuáticos (Kabata-Pendias, 2000).

### C) Valoración e índices de tolerancia

Bradshaw (1952) fue uno de los primeros en valorar la falta de tolerancia de *Agrostiscapillaris*, crecida en un suelo contaminado con Pb, mediante la inhibición del crecimiento radical. Posteriormente Wiikins (1957) desarrolló un índice basado en la cuantificación de los efectos inhibitorio de los iones metálicos en el crecimiento radical.

De esta manera, cuanto mayor es la longitud de la raíz en la disolución que contiene el metal, mayor es el índice de tolerancia (Bradshaw y McNeill, 1985).

Este método de valoración ha sido usado ampliamente y modificado y refinado por muchos autores.

También, se ha utilizado la biomasa de la raíz (Verkleij y Bast-Cramer, 1985) o el crecimiento de tubo polínico en un medio líquido en el cual se han añadido metales (Searcy y Mulcahy, 1985).

#### - Índice de Bioconcentración (BF)

Se define como la relación de la concentración de metales en la planta con respecto a la concentración total de metales en el suelo (Figliolia et al., 2002 y Perez-Sirvent, 2008).

Este índice es ampliamente usado para comparar la eficiencia de diferentes plantas (Kabata- Pendías, 2000).

- Factor de remediación

También conocido por Factor de Remediación (RC). Es la proporción del elemento contenido en la parte aérea de la planta con respecto a la superficie del suelo.

Este índice puede otorgar una indicación si la planta es apta para los procesos de fito extracción (Whitfield y Zeeb, 2010). Si este índice es mayor que 1, el objetivo de la remediación se da por cumplido y la eliminación de la vegetación contaminada sería económicamente más efectiva que la eliminación del suelo contaminado.

Si este índice es menor a uno, también podría ser aceptable, con lo cual una media de remediación de 0,5 podría ser suficiente. Por lo tanto es muy difícil estimar el índice mínimo a partir del cual la Fito extracción sería eficiente. (Wright, 2003)

- Grado de acumulación:

Muestra una representación de diferentes grados de bioacumulación de metales en planta verdes y hongos (Kabata-Pendias, 2000).

Estos autores plantean una clasificación para la bioacumulación desde ligera hasta muy intensa.

Es calculado como la relación de elementos traza contenidos en plantas y hongos, respecto a la concentración en los suelos (Kabata-Pendias, 2000).

- Nivel de resistencia:

Esta dado de acuerdo al valor máximo de concentración de Pb en el suelo ( $111286 \text{ mgkg}^{-1}$ ) las especies son agrupadas en las siguientes categorías: medianamente resistentes (hasta  $6000 \text{ mgkg}^{-1}$  de Pb en el suelo), resistentes (hasta  $12000 \text{ mgkg}^{-1}$  de Pb en el suelo), altamente resistentes (hasta  $24000 \text{ mg kg}^{-1}$  de Pb en el suelo) y extremadamente resistentes (más de  $24000 \text{ mg kg}^{-1}$  de Pb en el suelo).

En el caso de Zn estas especies fueron clasificadas de acuerdo al contenido máximo en el suelo ( $46500 \text{ mgkg}^{-1}$ ) en medianamente resistentes (hasta  $7000 \text{ mgkg}^{-1}$  de Zn en el suelo), resistentes (hasta  $14000 \text{ mgkg}^{-1}$  de Zn en el suelo), altamente resistentes (hasta  $28000 \text{ mgkg}^{-1}$  de Zn en el y suelo) y extremadamente resistentes (más de  $28000 \text{ mgkg}^{-1}$  de Zn en el suelo).

#### **2.4.5. Pasivo ambiental minero**

La denominación de pasivos ambientales mineros hace referencia a los impactos negativos generados por las operaciones mineras abandonadas con o sin dueño u operador identificables y en donde no se haya realizado un cierre de minas regulado y certificado por la autoridad correspondiente.

La referencia es extensiva a aquellos impactos que pueden causar los residuos (sólidos, líquidos y gaseosos) generados en el curso de las diferentes fases del proceso minero, y que han sido depositados en presas de escombreras u otra forma de almacenamiento, sin un manejo ambientalmente apropiado.

El Proyecto de Ley N° 380/2002-CR, del Ministerio de Energía y Minas del Perú, que regula los pasivos ambientales mineros hace alusión a los siguientes tipos de impactos que habrían producido los pasivos:

Degradación de las aguas de los ríos, lagos y mares: producida esencialmente por el vertimiento de residuos sólidos y líquidos, con alto contenido de sustancias contaminantes,

Degradación del aire, suelos, flora, fauna y paisaje; generada también como consecuencia de los vertimientos o emisiones, Deforestación: destrucción de la cobertura vegetal, que bien pondría en peligro la estabilidad de taludes y los proceso de almacenamiento del agua en el suelo, eliminación o disposición inadecuada de sustancias y residuos: referido mayormente a la deposición de material de desechos y escombreras, y que ocupan áreas que mayormente se encuentran a la intemperie.

#### **2.4.6. Relaves mineros**

Los relaves mineros corresponden al residuo del proceso de concentración de minerales sulfurados de cobre por flotación alcalina (Dold y Fontboté, 2001).

A grandes rasgos, este proceso involucra la molienda de la roca con minerales, la adición de 60% a 80% de agua aproximadamente, la adición de reactivos de flotación y espumantes, la inyección de aire para la generación de burbujas, la extracción del mineral flotado y la eliminación de la pulpa remanente denominada relave (Green, 2001; Casale, 2011). La pulpa residual o relave es canalizada hasta un sector de acopio permanente mediante tuberías o canaletas. (Ramírez, 2012)

#### **2.4.7. Metales pesados**

Se considera metal pesado a aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 5 gr/cm<sup>3</sup> cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinos térreos).

Junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos que aunque son metales ligeros o no metales, se suelen englobar con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados; este es el caso del arsénico, bario y selenio.

Los metales pesados, y en general los elementos traza, están presentes en relativamente bajas concentraciones (mg/kg) en la corteza terrestre, los suelos y las plantas.

La presencia de concentraciones nocivas (anomalías) en los suelos es una degradación especial denominada contaminación. Legalmente, se entiende por contaminación la producida por estos contaminantes.

La movilidad de los elementos traza depende de su especiación, y también está afectada por diversos parámetros geo edáficos.

En los últimos años se han obtenido diferentes aproximaciones a la especiación de elementos traza usando métodos directos e indirectos.

Los metales pesados, en pequeñas cantidades, pueden ser beneficiosos y hasta imprescindibles para los organismos vivos.

Sin embargo, pasado cierto umbral pueden convertirse en elementos muy peligrosos, debido a que no pueden ser degradados y tienen una lenta y difícil eliminación (Millan et al., 2007).

Esta persistencia, acumulación progresiva y/o transferencia a la cadena alimentaria supone una amenaza para la salud humana y la de los ecosistemas (Gulson et al., 1996; Becerril et al., 2007), siendo este su mayor problema (Bech et al., 2002).

Así por ejemplo se ha observado que el Zn tiene una permanencia de 70 a 510 años, el Cd de 13 a 1100 años y el Cu de 310 a 1500 años.

Estos intervalos varían notablemente según los regímenes de humedad y temperatura del suelo. Bowen (1979) señala que en

suelos templados la permanencia para el Cd es de 75 a 380 años, Hg 300 a 1000 años y Ag, Cu, Ni, Pb, Se y Zn 1000 a 3000 años. (López, 2009)

Una alta concentración de metales pesados afecta la biota ya que se producen interacciones a nivel celular y/o molecular.

Además, también queda afectada la calidad del suelo ya que inhibe la descomposición de la materia orgánica y los procesos de mineralización del N, ocasionando graves problemas para el desarrollo y mantención de la cubierta vegetal (García y Dorronsoro, 2002; Hall, 2002; Selim y Kingery 2003; Wong, 2003).

Las extracciones mineras, además, ocasionan una clase textural desequilibrada; ausencia o baja presencia de estructura edáfica a causa de la ausencia de la capa superficial del suelo; erosión periódica de la cubierta (Wong, 2003), ausencia de materiales finos formadores de suelo, propiedades químicas anómalas, disminución o desequilibrio de los nutrientes fundamentales; ruptura de los ciclos biogeoquímicos, baja profundidad efectiva, dificultad de enraizamiento, baja capacidad de cambio, baja retención de agua y presencia de compuestos tóxicos (Wong et al., 1999; García y Dorronsoro, 2002).

#### **2.4.7.1. Disponibilidad de metales pesados.**

López y Grau (2005), definen el término biodisponibilidad como la capacidad de un elemento para pasar de un compartimento cualquiera del suelo a un ser vivo.

Esta movilidad, que se define como la aptitud de transferencia de metales pesados entre compartimentos, está determinada por la forma, el número de cargas y la energía de retención de los metales pesados (Reid, 2001) y se ve influenciada por factores externos (pH, temperatura, humedad, ambiente químico, etc.) aunque también se puede asociar con el uso del suelo, por ejemplo, los metales en suelos forestales son más fácilmente movilizados que en suelos agrícolas, lo que está directamente relacionado con mayor acidez del suelo y la mayor presencia de sustancias orgánicas de bajo peso molecular (Kabata - Pendías, 2000).

Por tanto, la biodisponibilidad de contaminantes depende de sus propiedades químicas, las propiedades del suelo, las condiciones ambientales y la actividad biológica (Pilón -Smits, 2005).

#### **2.4.7.2. Factores del suelo que afectan la acumulación y disponibilidad de metales.**

Los principales factores del suelo que afectan la acumulación y disponibilidad de los metales pesados son:

##### **a) pH**

Es uno de los parámetros más importante para definir la movilidad del catión (Wong, 2003).

Esencialmente las fracciones más móviles de iones ocurren en los rangos menores de pH.

Aunque la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, algunas especies químicas de Mo y Se están más disponibles a pH básicos (Kabata- Pendías, 2000; García y Dorronsoro, 2005).

En medios alcalinos pueden pasar nuevamente a la solución como hidroxicomplejos (López y Grau, 2005).

Pero en general, con un aumento del pH del suelo, la solubilidad de muchos metales pesados disminuye y la concentración de elementos traza es menor en la solución de suelos neutros y básicos que aquellos ligeramente ácidos (Kabata -Pendías, 2000).

## **b) Materia orgánica**

La materia orgánica tiene una gran importancia en todos los procesos de adsorción del suelo.

Actúa como ligandos en los complejos de intercambio, mediante la cesión de electrones de ciertas moléculas a cationes metálicos, que aceptan estos electrones, formando los quelatos que pueden migrar con facilidad a lo largo del perfil (Pilón, 2005).

Por tanto, la complejación por la materia orgánica del suelo es uno de los procesos que gobiernan la solubilidad y la bioasimilación de metales pesados.

La toxicidad de los metales pesados se potencia, en gran medida, por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión (Adriano, 1986).

### **c) Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn**

Juegan un importante papel en la retención de los metales pesados.

Tienen una alta capacidad de fijar los metales pesados e inmovilizarlos.

Además, estos compuestos se presentan finamente diseminados en la masa del suelo por lo que son muy activos.

Los suelos con altos contenidos de Fe y Mn tienen una gran capacidad de adsorber metales divalentes, especialmente Cu, Pb y en menor grado Zn, Co, Cr, Mo y Ni (Doménech, 1995).

### **d) Plomo**

Se ubica en el grupo IVA (metales) en la tabla periódica.

El Pb es un metal gris azulino que se presenta en forma natural y en pequeñas cantidades (0,002 %) en la corteza terrestre.

Este elemento, es generalmente obtenido de la galena (PbS), la anglesita (PbSO<sub>4</sub>) y la curositita (PbCO<sub>3</sub>).

El Pb es tóxico para el sistema nervioso y se asocia con la depresión de muchas funciones endocrinas, aunque no hay evidencia de efectos teratogénicos o carcinogénicos.

En el suelo, se encuentra principalmente en forma de Pb<sup>2+</sup>, también es conocido su estado de oxidación +4.

Algunos de los compuestos insolubles son Pb (OH)<sub>2</sub>, PbCO<sub>3</sub>, PbS, PbSO<sub>4</sub>.

La velocidad de oxidación depende de factores como la humedad, la temperatura, el pH, el potencial redox, la cantidad de materia orgánica o la roturación de los suelos (Guitart, 2005).

- Efecto del plomo en el medio ambiente:

El plomo (Pb) se considera un contaminante ecotoxicológico ya que su uso provoca contaminación ambiental.

La principal vía de biodisponibilidad son el suelo y el polvo, donde se concentra y por medio del cual ingresa a los organismos.

El manejo inadecuado de materiales con plomo ha sido causante de numerosos problemas ambientales en todo el mundo; sin embargo, no todo el plomo del suelo presenta el mismo grado de movilidad o biodisponibilidad.

La distribución química del plomo en el suelo depende del pH, de la mineralogía, textura, materia orgánica así como de la naturaleza de los compuestos de plomo contaminantes.

El suelo es uno de los mayores reservorios en los cuales se acumula la contaminación ambiental (Alloway, 1995).

Más del 90% de la contaminación ambiental producida es retenida en las partículas de suelo y cerca del 9% es interceptada en los sedimentos acuáticos.

Particularmente, la contaminación de un suelo contaminado con este metal es de preocupación ya que éste presentan un alto tiempo de residencia en el suelo, estableciéndose un equilibrio dinámico con la hidrosfera, atmósfera y biosfera y de esta forma alterando el ecosistema, incluyendo al ser humano (Huang, 1999).

El plomo es uno de los metales pesados conocido desde la antigüedad y es un potente contaminante ambiental, altamente tóxico para el hombre.

Su presencia en el ambiente se debe principalmente a actividades antropogénicas como la industria, minería y al uso de las gasolinas con plomo y disposición de ciertos desechos industriales (Chaney y Ryan, 1994; Cooper et al., 1999).

El Pb originado de dichas actividades puede permanecer como residuo por 1000 a 3000 años en los suelos de clima templado (Bowen, 1979).

Dicho metal se acumula en las capas superficiales del suelo y, por lo tanto, es difícil medir confiablemente su concentración. Su disponibilidad depende de su cantidad y las condiciones del suelo, como el tamaño de partícula, la capacidad de intercambio catiónico y de factores de las plantas, como la superficie y exudados de la raíz, micorrización y de la transpiración (Davies, 1995).

El Plomo no solo afecta el crecimiento de las plantas y su productividad, sino que entra en la cadena alimenticia, causando daños en la salud del hombre y animales (Seaward y Richardson, 1991).

Dicho metal tiene efectos tóxicos en muchos órganos, sistemas y procesos fisiológicos, incluyendo el desarrollo de la línea roja hemática, los riñones, el sistema cardiovascular, el aparato reproductor y, probablemente el aspecto de mayor gravedad, el desarrollo del sistema nervioso central.

La naturaleza de las manifestaciones de toxicidad depende no sólo de la magnitud de la exposición sino también de las características de la persona expuesta; la neurotoxicidad del Pb es más crítica para el feto en desarrollo y el niño en crecimiento que para los adultos (Sanin et al., 1998).

#### **2.4.8. Suelo**

Es la cubierta superficial de la mayoría de la superficie continental de la tierra.

Es un agregado de minerales no consolidados y de partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento, el agua y los procesos de desintegración orgánica. (Abollino et al., 2002).

##### **2.4.8.1. Dinámica de los metales pesados en el suelo**

Según García y Dorronsoro (2005), los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías.

- Quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución o bien fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación.
- Pueden ser absorbidos por las plantas y así, incorporarse a las cadenas tróficas
- Pasar a la atmósfera por volatilización
- Movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas (Wright, 2003)

En general se considera que la movilidad de los metales pesados es muy baja, quedando acumulados en los primeros centímetros del suelo.

La lixiviación a los horizontes sub superficiales es, por tanto, en muy bajas cantidades.

Es por ello que la presencia de altas concentraciones en el horizonte superficial seguida de un drástico descenso a los pocos centímetros de profundidad es un buen criterio de diagnóstico de contaminación antrópica. (Durán, 2010).

#### **2.4.8.2. Efecto de los metales pesados en el suelo:**

Cuando, el contenido de metales pesados en el suelo alcanzan niveles que rebasan los límites máximos permitidos causan efectos inmediatos como inhibición del crecimiento normal y el desarrollo de las plantas, y un disturbio funcional en otros componentes del ambiente así como la disminución de las poblaciones microbianas del suelo, el término que se usa o se emplea es “polución de suelos” (Martín, 2000).

La caracterización, evaluación y remediación de un suelo contaminado es uno de los principales retos ambientales por abordar en los próximos años.

La peligrosidad de los contaminantes en los suelos viene dada no sólo por su concentración total, sino especialmente por su disponibilidad.

En el suelo, los metales pesados están presentes como iones libres, compuestos metálicos solubles, compuestos insolubles como óxidos, carbonates e hidróxidos. Su acción directa sobre los seres vivos ocurre a través del bloqueo de las actividades biológicas, es decir, la inactivación enzimática por la formación de enlaces entre el metal y los grupos -SH (sulfhidrilos) de las proteínas, causando daños irreversibles en los diferentes organismos. (Wang, 1992).

El pH es un factor esencial, para que la mayoría de los metales tiendan a estar más disponibles en un pH ácido, excepto As, Mo, Se y Cr, los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino es una variable importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios con pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos.

La adsorción de los metales pesados está fuertemente condicionada por el pH del suelo y por tanto, también su biodisponibilidad de sus compuestos (Alloway, 1995).

La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente a algunos metales, como es el cobre, que pueden quedar en forma no disponible por las plantas, motivo por el cual, algunas plantas crecidas en suelos ricos en materia orgánica, presentan carencia de elementos como el cobre, plomo y zinc, eso no significa que los suelos no estén contaminados ya que las poblaciones microbianas se reducen notablemente.

La textura favorece la entrada e infiltración de la contaminación de metales pesados en el suelo, por ejemplo la arcilla tiende a adsorber a los metales pesados, que quedan retenidos en sus posiciones de cambio, por el contrario los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales pasan rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los niveles freáticos (Pineda, 2004).

De manera similar su disponibilidad para las plantas está en función del pH del suelo.

En el gráfico 2 se puede apreciar un esquema donde se muestra el porcentaje de metales que puede ser absorbido por el suelo dependiendo del pH.

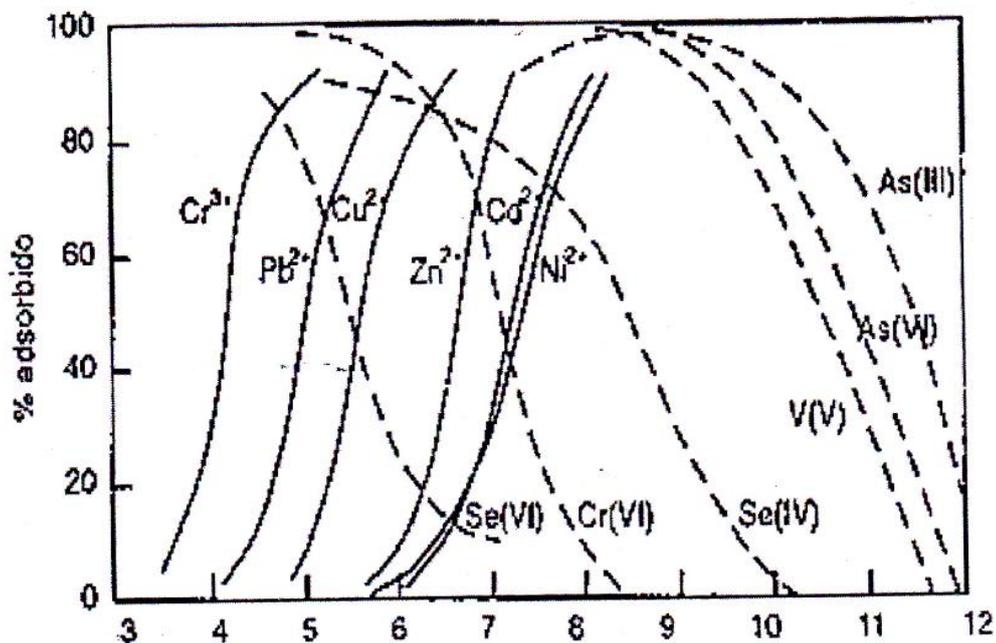
La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto el As, Mo, Se y Cr, los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino (Kabata - Pendías, 2000).

En medios muy alcalinos, pueden nuevamente pasar a la solución como hidroxicomplejos.

Por otra parte, algunos metales pueden estar en la disolución del suelo como aniones solubles.

Tal es el caso de los siguientes metales: Se (Selenato y/o Selenito), V (Vanadato), As (Arseniato y/o Arsenito), Cr (Cromatos).

**Gráfico N° 2. Influencia del pH sobre la adsorción de algunos metales, a diferentes pH.**



Fuente: Kabata-Pendias, 2000.

La adsorción de los metales pesados está fuertemente condicionada por el pH del suelo (y por tanto, también su solubilidad). Otros metales como el cadmio (Cd) y el zinc (Zn), se pueden absorber en mayor grado en plantas como rábanos y zanahorias (Intawongse D., 2006).

#### **2.4.9. Estándares de calidad ambiental y límites máximos**

El Estándar de Calidad Ambiental (ECA) y el Límite Máximo Permisible (LMP) son instrumentos de gestión ambiental que consisten en parámetros y obligaciones que buscan regular y proteger la salud pública y la calidad ambiental en que vivimos, permitiéndole a la autoridad ambiental desarrollar acciones de control, seguimiento y fiscalización de los efectos causados por las actividades humanas.

Los estándares de calidad ambiental son indicadores de calidad ambiental, miden la concentración de elementos, sustancias, parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, pero que no representan riesgo significativo.

Los límites máximos permisibles miden la concentración de elementos, sustancias, parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en las emisiones, efluentes o descargas generadas por una actividad productiva (minería, hidrocarburos, electricidad, etc.), que al exceder causa daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente.

Una de las diferencias es que la medición de un estándar de calidad ambiental se realiza directamente en los cuerpos receptores, mientras que en un límite máximo permisible se da en los puntos de emisión y vertimiento.

Sin embargo, ambos instrumentos son indicadores que permiten a través del análisis de sus resultados, establecer políticas ambientales y correcciones el accionar de alguna actividad específica. (México, 2006).

Marco Normativo Peruano:

- Resolución Ministerial N° 225-2010-MINAM
- Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP) 2010-2011
  - Reporte de Avance del Plan de ECA y LMP 2011
  - Decreto Legislativo 1013
  - Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente
- Modificatoria del Artículo 99
  - Resolución Ministerial N° 141-2011-MINAM (Ratificación de lineamiento para la aplicación de LMP.
  - Reporte de Avance del Plan de ECA y LMP JULIO 2012
  - Resolución Ministerial N° 225-2012-MINAM
- Plan de Estándares de Calidad Ambiental y Límites Máximo Permisibles para Período 2012-2013.

#### **2.4.9.1. Estándares de evaluación para calidad de suelo.**

La reciente publicación de los estándares de calidad ambiental y límites máximos permisibles para suelo contribuye a evaluación estos estándares (Cuadro 1), sin embargo, se suelen realizar dichas comparaciones con otros estándares de calidad para suelos de uso agrícola, como los indicados en la Guía de Canadá (Canadian Environmental Quality Guidelines, December 2003). Y la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Cabe indicar que-la calidad de los suelos depende de diversos factores ambientales como: la constitución geológica, la fisiográfica, la hidrología y el clima; siendo

también afectada por actividades humanas. (Ministerio del Ambiente, 2013)

**Cuadro N° 1. Estándar de calidad Ambiental del Perú.**

Parámetros	Uso de suelos			Método de ensayo
	Suelo Agrícola	Suelo residencial	Suelo comercial/ industrial	
Plomo total (mg/kg MS)	70	140	1200	EPA 3050-B EPA 3051
Arsénico (mg/kg MS)	50	50	140	EPA3050-B EPA 3051

Fuente: Decreto supremo N° 002-2013-MINAM 2.2.10

## **CAPITULO III**

### **MARCO METODOLOGICO**

#### **3.1. TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.**

##### **3.1.1. Tipo de investigación**

Por el tipo de investigación el presente trabajo reúne las condiciones necesarias para ser una investigación experimental pura (explicativa), porque en base a los experimentos se encontrará la forma de absorción del plomo por la planta vegetal *Stipu ichu*, del suelo, considerando esta un fenómeno químico lo que ocurre.

##### **3.1.2. Nivel de investigación**

Por el nivel de investigación el presente trabajo se realizó en el laboratorio de análisis químico, siendo una investigación aplicada, porque esta solucionara un problema de contaminación ambiental que ha sido generado por la planta concentradora de Huari.

#### **3.2. MÉTODO**

El método de investigación es experimental a nivel de selección de 4 plantas que están desarrollando dentro del terreno de estudio como pruebas principales 4 plantas como replicas, suelo contaminado y la planta vegetal *Stipu ichu*.

### 3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Es la realización de una investigación mediante un diseño experimental factorial  $2 \times 2 = 4$ , teniendo en cuenta las variables a evaluar como es el caso del control de pH y la dosificación de urea como fertilizante.

Las pruebas experimentales duraron tres meses, siendo los meses setiembre, octubre y noviembre del 2014, mes que se culminó con las pruebas experimentales, para evaluar el contenido de plomo en las raíces, tallos y hojas de la planta vegetal *Stipu ichu*, para luego determinar el punto máximo de absorción de plomo del suelo contaminado según el tiempo transcurrido.

Con los niveles naturales expuestos se ha procedido a construir la matriz en función de la escala natural y codificada, que muestra en la cuadro 10, la cual servirá para el tratamiento estadístico del Cuadro ANOVA.

**Cuadro N° 2**

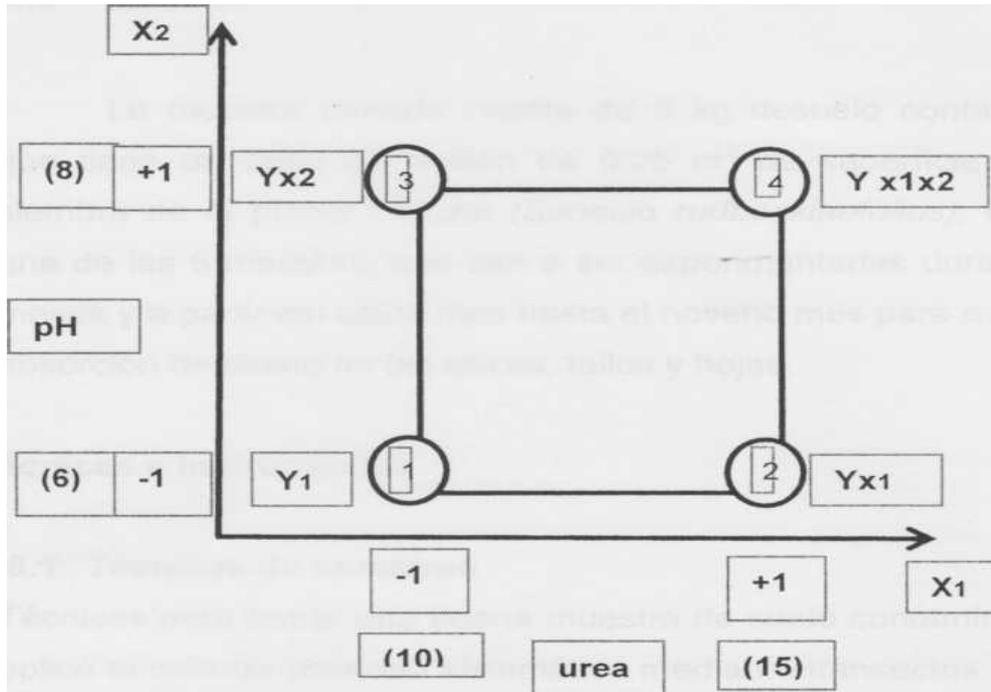
**Variabes en escala natural ( $Z_1 = \text{pH}$  y  $Z_2 = \text{urea}$ ) y variables en escala codificada ( $X_1$  - nivel), siendo la concentración de plomo ( $Y$ ).**

Experimento	$Z_1$	$z_2$	$X_1$	$X_2$		$y$
P1	6	10	-	-1	Y	$y_{12}$
P2	8	10	+	-1	y	$y_{22}$
P3	6	-	-	+	y	$y_{32}$
P4	8	15	+	+	y	$y_{42}$

Diseño Factorial Experimental  $2^2 = 4$

Variable	Nivel bajo (-)	Nivel Alto (-)
pH	6	8
Urea	10	15

**Gráfico N° 3. Niveles para un diseño factorial para K = 2 Tabla 11**



**Cuadro N° 3**

**Construcción se sustenta en el diseño factorial 2x2 (principal y replica±**

	Natural	Codificado	Respuesta		
N°	Z1	Z2	X1	X2	Y
P1	6	10	(-1)	(-1)	Y1
P2	8	10	(+1)	(-1)	YX1
P3	6	15	(-1)	(+1)	YX2
P4	8	15	(+1)	(+1)	YX1X2

### 3.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.4.1. Hipótesis General

La especie *Stipa Ichu* influye positivamente en la extracción del plomo en los pasivos ambientales mineros en la planta concentradora de Huari-La Oroya de la UNCP.

### 3.4.2. Hipótesis Específicas

- El contenido de plomo es superior a los límites máximos permitidos en los pasivos ambientales mineros en la planta concentradora de Huari - La Oroya de la UNCP.
- El contenido de plomo es superior a los límites máximos permitidos extraído en la planta *Stipa ichu*.

## 3.5. VARIABLES

### 3.5.1. Variable Independiente

#### A. Descripción

- **pH** = indica el grado de acidez o basicidad de una solución, éste se mide por la concentración del ión hidrógeno; los valores de pH están comprendidos en una escala de 0 a 14, el valor medio es 7; el cual corresponde a solución neutra por ejemplo agua, los valores que se encuentran por debajo de 7 indican soluciones ácidas y valores por encima de 7 corresponde a soluciones básicas o alcalinas.

Debido a que el pH indica la medida de la concentración del ión hidronio en una solución, se puede afirmar entonces, que a mayor valor del pH, menor concentración de hidrógeno y menor acidez de la solución.

- **Urea:** La Urea es un compuesto orgánico blanco y cristalino, de fórmula  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , conocida también como carbamida, perteneciente a la familia química de amidas

alifáticas. Presenta un punto de fusión de 132,7 °C, es soluble en agua (fácilmente en agua caliente) y en alcohol, y ligeramente soluble en éter.

### B. Indicadores

- **pH** = indica la medida de la concentración del ión hidronio
- **Urea** = En gr.

### 3.5.2. Variable Dependiente

#### A. Descripción

**Fitoextracción:** Capacidad extraer plomo por la planta *Stipa Ichu* del suelo.

#### B. Indicadores

- Concentración de Plomo

### Cuadro N° 4

#### MATRIZ DE OPERACIONALICACION DE VARIABLES

Variable	Definición	Indicadores	Ítems	Técnica de medición	Instrumento de medición
pH	- indica la medida de la concentración del ión hidronio en una solución	- Acidez	1	- Potenciómetro	- Peachimetro
urea	- La Urea es un compuesto orgánico blanco y cristalino, de fórmula $CO(NH_2)_2$	- Presencia de urea	2	- Cantidad de urea en el suelo	- Balanza

## **3.6. COBERTURA DEL ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN**

### **3.6.1. Universo**

El área afectada por el pasivo ambiental de la concentradora de Huari que se encuentra en la zona de estudio.

### **3.6.2. Población**

La población investigada tiene una extensión de 2,5 hectáreas de suelo contaminado, habitable y para cultivo, zona denominada Huari, ubicada en el distrito de La Oroya, provincia de Yauli, región Junín.

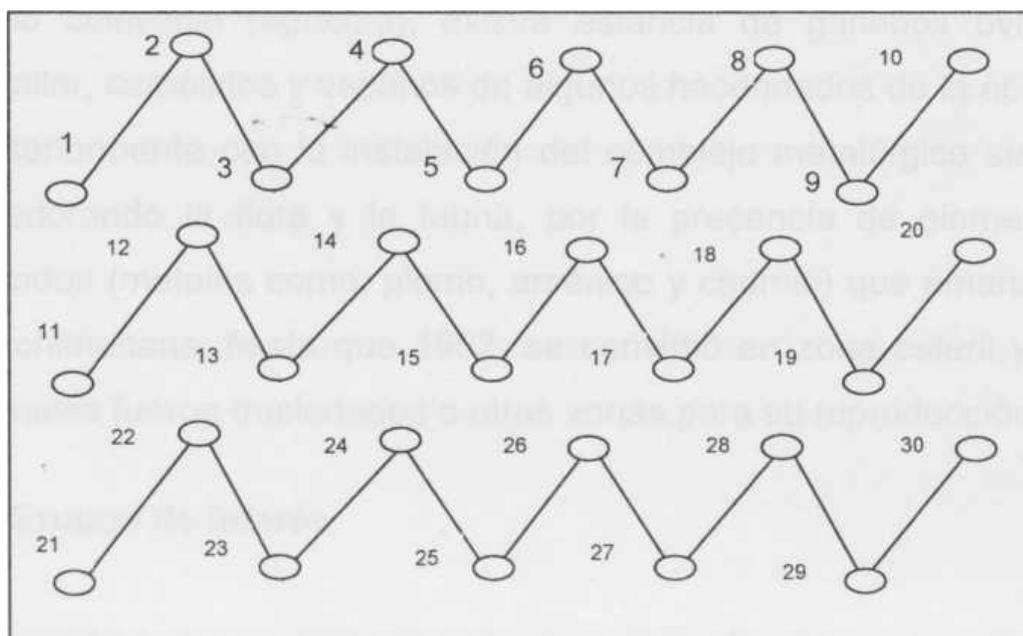
### **3.6.3. Muestra**

La muestra tomada consta de 4 plantas de *Stipu ichu* contaminado, que tiene un radio de acción de 0,25 m<sup>2</sup> de superficie en cada una, que van a ser experimentadas durante nueve meses y a partir del sexto mes hasta el noveno mes para evaluar la absorción de plomo en las tallos.

### **3.6.4. Muestreo**

Técnicas para tomar una buena muestra de *Stipu ichu* contaminado, se aplicó el método aleatorio sistemático mediante transectos en zig - zag. Método bastante confiable, inclinación de 30°, a una distancia de 15 m, según la guía de muestreo y análisis de suelos.

**Gráfico N° 4.- Esquema de muestreo zig - zag, (30 muestras).**



### **3.7. TÉCNICAS, INSTRUMENTOS Y FUENTES DE RECOLECCIÓN DE DATOS.**

#### **3.7.1. Técnicas de la investigación**

El método de recolección de datos utilizado fue la de experimental directo, porque fueron tomados de campo. El Instrumento de recolección de datos fue el cuaderno de campo, en el cual se registró las actividades realizados antes, durante y después del experimento. Los datos operativos de la experimentación fueron recolectados mediante muestreo y análisis físico y químico de las muestras.

#### **3.7.2. Instrumentos de la investigación**

La recolección de datos previo a la investigación, se ha realizado de cuatro fuentes:

### a) Grupos de Interés

Viendo el impacto de la contaminación de metales pesados, se comentó bastante sobre el cumplimiento del PAMA, pero; por la falta de financiamiento quedó paralizado, sobre ello grupos ambientales como el movimiento por la salud de La Oroya (MOSAO), organismo no gubernamental Tomayra Pacsi, y organismo no gubernamental Mantaro revive, exigieron al estado peruano la indemnización por los daños ocasionado al suelo de la población de la que están en las riberas del río Mantaro por el incumplimiento al PAMA .

### b) Evaluación de la característica de suelo contaminado

Para iniciar la investigación se procedió a la recolección de muestras de suelo contaminado en los pasivos ambientales de la concentradora de Huari, y la respectiva caracterización mediante análisis químico, que fue efectuada en la facultad de Ingeniería Química de UNCP, y que se reporta en la tabla.

Análisis de suelo contaminado por los pasivos ambientales mineros de la concentradora de Huari-Oroya

**Cuadro N° 5: Análisis de Suelo**

<b>Muestra</b>	<b>Clave</b>	<b>Mg de Pb/kg de suelo</b>
A.Q.	Suelo contaminado	832,66

### **c) Evaluación de plantas Fito extractoras**

Antes de iniciar la investigación de fito extracción a nivel de laboratorio, lo primero que se realizó fue recolectar las plantas vegetales que crecían en el suelo contaminado de la zona en estudio, parte superior. Se retiraron cuatro plantas vegetales: *Stipu ichu*

Se tomaron las muestras de las plantas y del suelo para hacer analizar el contenido de plomo.

### **d) Evaluación de la planta *Stipu ichu***

- La Planta *Stipu ichu* también conocida como el ichu, paja brava o paja ichu (*Stipa ichu*) es un pasto del altiplano andino sudamericano, Perú, México y Guatemala empleado como forraje para el ganado, principalmente de camélidos sudafricanos.
- La planta seleccionada del lugar que se está experimentando se hace un corte del tallo.
- Para el análisis químico de la planta *Stipu ichu*, se sometió a un lavado minucioso, con abundante agua para eliminar cualquier impureza que se pueda impregnar en la planta.
- La planta vegetal en estado limpio y seco, se llevó en un sobre al laboratorio de Tecnología de la Universidad Nacional del Centro del Perú, para el análisis correspondiente.

### 3.7.3. Fuentes de recolección de datos

Se pesó al tallo recolectado 3 g, se procedió al carbonizado en flama hasta la eliminación de total, para luego calcinar en una mufla 500 °C, durante tres horas en la planta piloto de no metálicos, de la Facultad de Ingeniería Química, luego se atacó con 5 ml de HCl (20 %, a continuación se llevó a sequedad en un vaso de precipitación de 250 ml durante un lapso de 2 minutos, nuevamente se añade 20 ml de agua destilada para diluir y se filtró en una fiola de 50 ml, se separan en tubos de ensayo de 5 ml, se procedió al análisis correspondiente en el espectrofotómetro UV-1230, con el test de Pb.

## 3.8. PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN.

### 3.8.1. Estadísticas

Los resultados obtenidos del análisis químico de dos corridas de absorbancia son los siguientes:

**Cuadro N° 6 Absorbancia**

ABSORBANCIA	
PP1	10.26
PP2	7.82
PP3	6.19
PP4	7.95
PP1	10.61
PP2	7.487
PP3	7.04
PP4	7.57

### 3.8.2. Representación

Para realizar el análisis respectivo se presentan los siguientes cuadros

Cantidad de plomo absorbido por la planta *Stipu ichu* en la prueba principal.

**Cuadro N° 7**

**Resultado Conc. Pb = (Factor x Absorbancia x Volumen Final) /  
(Muestra peso)**

Prueba	Factor	Absorbancia	Volumen	Muestra	Conc.
			en	(g)	Pb
PP1	5,95	10,26	25	5,00	305,24
PP2	5,95	7,92	25	5,00	235,52
PP3	5,95	6,19	25	5,00	184,15
PP4	5,95	7,95	25	5,00	236,51

**Cuadro N° 8**

Cantidad de plomo absorbido por la planta *Stipu ichu* en la prueba replica.

**Resultado Conc. Pb = (Factor x Absorbancia x Volumen Final) /  
(Muestra peso)**

Prueba	Factor	Absorbancia	Volumen	Muestra	Conc.
			(ml)	(g)	Pb
PR1	5,95	10,61	25	5,00	315,65
PR2	5,95	7,487	25	5,00	222,73
PR3	5,95	7,04	25	5,00	209,44
PR4	5,95	7,57	25	5,00	225,21

Descontaminación del suelo zona de los pasivos ambientales de Huari - La Oroya Planta vegetal *Stipu ichu* .

**Cuadro N° 9**  
**DISEÑO EXPERIMENTAL = 2<sup>2</sup>**

		FACTOR B (UREA)		
		-1	1	Ai
F A C T O R A (pH)	-1	305.24	184.15	1014,48
		315.65	209.44	
		620.89	393.59	
	1	235.52	236.51	919.97
		222.73	225.21	
		458.25	461.72	
	Bi	1079.14	855.31	1934.45

a = 2      Niveles del factor A = 2  
 b = 2      Niveles del factor B = 2  
 r = 2      repeticiones r = 2  
 n = 8

Hallando los valores para el cuadro de anova

$$F(CM) = (\sum_{i=1}^n Y_i)^2/n \quad F(CM) = \text{Corrección de la media}$$

$$F(CM) = 467762,1$$

$$SCt = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - F(CM)$$

$$SCt = 14555,463$$

$$SCA = \sum_{i=1}^n \frac{A_i^2}{b \cdot r} - F(CM)$$

$$SCA = 1116,5175$$

$$SCB = \sum_{i=1}^n \frac{Bi^2}{a.r} - F(CM)$$

$$SCB = 6262,4836$$

$$SCab = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{ABij^2}{r} - SCA - SCB - F(CM)$$

$$SCAB = 6656,8491$$

$$SCE = SCT - SCA - SCB - SCab$$

$$SCE = 519,61315$$

**Cuadro N° 10**  
**Grado de liberación**

Grado liberación A		a - 1		1
Grado liberación B		b - 1		1
Grado liberación AB		(a-1)(b-1)		1
Grado liberación A		a.b.r - 1		7

### 3.8.3. Comprobación de la hipótesis

Con el cuadro de análisis de varianza se comprueba la hipótesis formulada.

**Cuadro N° 11**  
**Cuadro ANOVA**

<b>Fuentes de Variación</b>	<b>Grado de Libertad</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>Fe</b>
A	GL(A)	SCA	SCA/GLA	CMA/CME
B	GL(B)	SCB	SCB/GLB	CMB/CME
AB	GL(AB)	SCAB	SCAB/GLAB	CMAB/CME
Error	x Difer	x Difer	SCE/GLE	
TOTAL	GL(total)	SCT		

Fuentes de Variación	Grado de Libertad	SC.	C.M.	Fe	Es	Ft (0.05)
A	1	1116,52	1116,52	8,59	<	7,71
B	1	6262,48	6262,48	48,21	>	7,71
AB	1	6656,85	6656,85	51,24	<	7,71
Error	4	519,61	129,90			
Total	7	14555,46				

A	<p>Hi: El pH influye en la absorción de Pb por la planta <b>Stipu ichu</b></p> <p>Ho: El pH no influye en la absorción de Pb por la planta <b>Stipu ichu</b></p>
B	<p>Hi: La urea influye en la absorción de Pb por la planta <b>Stipu ichu</b></p> <p>Ho: La urea no influye en la absorción de Pb por la planta <b>Stipu ichu</b>.</p>
AB	<p>Hi: El pH y la dosificación de urea influyen en la absorción de plomo por la planta <b>Stipu ichu</b>.</p> <p>Ho: El pH y la dosificación de urea no influyen en la absorción de plomo por la planta <b>Stipu ichu</b>.</p>

Regla

Fc	>F tabla se rechaza la Ho y se acepta la Hi
Fc	< F tabla Se acepta la Ho y se rechaza la Hi

## CAPITULO IV

### ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

**El primer resultado en base al primer objetivo específico es:**

El resultado es 832,66 Pb/kg.

**El segundo resultado en base al segundo objetivo específico:**

El resultado es 241.805 g.

#### 4.1.1. Evaluación de la presencia de Pb absorbido en la planta *Stipu ichu*.

Con el resultado que arrojan en el espectrofotómetro, se tiene una absorbancia de plomo, el cual se muestra en el cuadro, con su respectiva concentración de Pb en la planta analizada, que fueron cuatro y que se presentan el resultado en la tabla.

**Cuadro N° 12**

Contenido de plomo Fito extraído en la planta *Stipu ichu* (*primer análisis*)

Prueba	Factor	Absorbancia	Volumen (ml)	Muestra (g)	Conc. Pb
PP1	5,95	10,26	25	5,00	305,24
PP2	5,95	7,92	25	5,00	235,52
PP3	5,95	6,19	25	5,00	184,15
PP4	5,95	7,95	25	5,00	236,51

**Cuadro N° 13**

Contenido de plomo Fito extraído en la planta *Stipu ichu (replica)*

<b>Prueba</b>	<b>Factor</b>	<b>Absorbancia</b>	<b>Volumen (mi)</b>	<b>Muestra (g)</b>	<b>Conc. Pb</b>
PR1	5,95	10,61	25	5,00	315,65
PR2	5,95	7,487	25	5,00	222,73
PR3	5,95	7,04	25	5,00	209,44
PR4	5,95	7,57	25	5,00	225,21

**4.1.2. Resultados generales.**

De los análisis realizados en laboratorio se tiene los siguientes resultados del contenido de plomo extraído por la planta *Stipu ichu*.

**Cuadro N° 14**

Contenido de plomo *Stipu ichu*

<b>Conc. Pb</b>	<b>Conc. Pb (Replica)</b>
305,24	315,65
235,52	222,73
184,15	209,44
236,51	225,21

Los resultados indican una ligera variación, posiblemente por las condiciones climáticas y características propias del crecimiento de la planta. Para el reporte adecuadamente los resultados se han considerado los promedios que se detallan en el siguiente cuadro.

### Cuadro N° 15

Promedio de concentración

Concentración $\bar{X}$
310,44
229,12
196,80
230,86
Total= 241.805

#### 4.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

La Fito extracción con la planta *Stipa ichu* influirá en la reducción de suelos contaminados por plomo.

#### Cálculo del Estimado Puntual o Centrado: PRUEBA DE HIPÓTESIS

$$P(X - E_0 \leq \mu \leq X + E_0) = 1 - \alpha; \quad E_0 = \frac{Z_0 - \delta}{\sqrt{N}}$$

$$1.821 \leq \mu \leq 2,399$$

Calculo de  $Z_0$  :  $Z_0=1,96$

Reemplazando :  $\mu = 1.8$

Prueba de Hipótesis concerniente a la media poblacional

$$H_0: \mu = 1.8$$

$$H_1: \mu > 1.8$$

$H_0$  = Nunca, la Fito extracción con la planta *Stipu ichu* influirá en la reducción de suelos contaminados por Pb.

$H_1$  = Siempre, la Fito extracción con la planta ***Stipu ichu*** influirá en la reducción de suelos contaminados por Pb.

### Regla de decisión

Se rechaza  $H_0$  si:

$$t > -t_{1-\alpha}(gl)$$

Cálculo de "Z"

$$t = \frac{X - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad t = 2.06$$

Cálculo de  $Z_n$ :

$$t_{1-\alpha}(gl) \quad t_c = 1.71$$

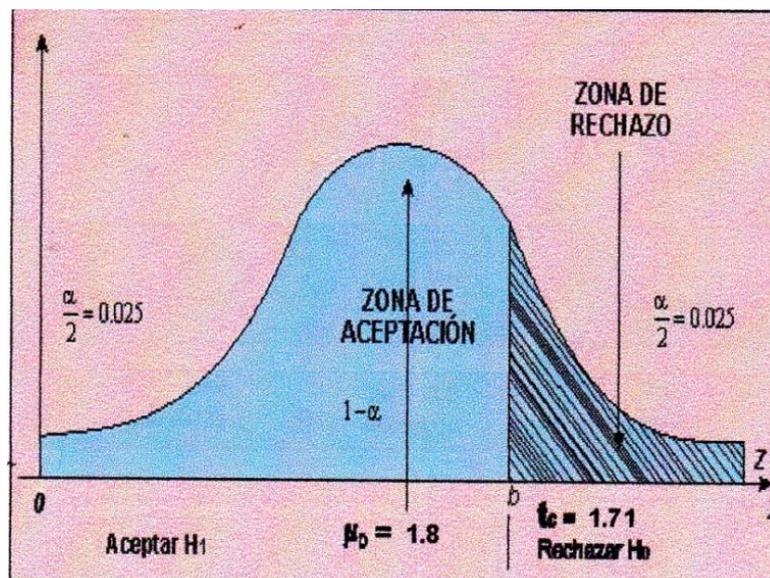
Decisión:

$$t > -t_{1-\alpha}(gl)$$

$$2.06 > 1.71$$

### Grafico N° 5.

Curva de Simetría de Gauss.



### **Interpretación:**

Se acepta la  $H_1$ : “Siempre, la Fito extracción con la planta *Stipu ichu*, influirá en la reducción de suelos contaminados por plomo” y se rechaza la  $H_0$ ; debido a que el valor de  $t_c = 1.71$ , se encuadra en la zona de rechazo derecha de la Curva Simétrica de Gauss. (Coeficiente de Pearson).

### **4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

El contenido obtenido de Fito extraído varía desde un máximo de 310,44 mg de Pb/kg a un mínimo de 196,80 mg de Pb/kg.

Esto se debe a la variación de las condiciones del suelo en donde se encuentra la planta y las condiciones del clima que repercuten en el crecimiento, así como también el contenido de plomo que se encuentra en esta área del pasivo ambiental.

Por otro lado las condiciones óptimas de Fito extracción es de pH = 6, se debe a que favorece a la solubilidad de plomo en el suelo, la que es absorbida con facilidad por la planta.

Lo que no se logra cuando el pH = 8 que<sup>3</sup> es básico, debido a que el plomo contenido en el suelo contaminado posiblemente forma sales insolubles, que no permiten ser asimilado por la planta.

La urea se caracteriza por aportar nutrientes básicos para el desarrollo de la planta así mismo proporciona iones hidrogeno que participa activamente en la solubilidad del plomo esta es muy alta cuando el pH = 6 y la dosificación de urea fue de 10 g por planta en diferentes periodos de crecimiento.

## CONCLUSIONES

- La especie *Stipa ichu* que se encuentran en el pasivo ambiental minero de la planta concentradora Huari tiene la capacidad de extraer el plomo, mediante la técnica de fito extracción
- La concentración de plomo en el suelo del pasivo ambiental que se determinó mediante análisis químico fue de 832.65 mg de Pb/kg de suelo.
- La concentración del metal extraído por la planta *Stipa ichu* fue 241,805 mg/kg como promedio.

## **RECOMENDACIONES**

- Realizar monitoreo de agua, suelo y aire en el pasivo ambiental minero de Huari, pues las poblaciones aledañas podrían verse afectadas.
- Realizar estudios sobre las concentraciones de metales pesados en pastos, tubérculos, carne y en el poblador cercano a la planta concentradora.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Becerril J.M., Barrutia O., García Plazaola J.I., Hernández A., J.M. Olano, C. Garbisu (2007). Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. *Ecosistemas* 16 (2): 50-55.
- Beltrán Villavicencio, Margarita (2001). Fitoextracción en suelos contaminados con Cadmio y Zinc usando especies vegetales comestibles.
- Bradshaw, A. D. y McNeilly, T. (1985) Evolución y contaminación. Cuadernos de Biología. Ed. Omega
- Cabezas, J.G.; Alonso, J.; Pastor, J; Sastre-Conde, I. (2004). Absorción y acumulación de metales pesados en tres especies vegetales en suelos enmendados con lodos de depuradora. Madrid, España.
- Calderón, L.; Concha, R. (2008). Evaluación de las concentraciones de metales pesados para determinar la calidad de frutas de consumo masivo en la ciudad de Piura (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Piura, Perú.
- Cáritas Arquidiocesana de Huancayo (2007), proyecto: „El Mantaro Revive"" Avances de Resultados de Evaluación de calidad Ambiental de los recursos agua ysueloA2A pg.
- Casale, J.F, Ginocchio, R. y León-Lobos, P.,( 2011). Fitoestabilización de depósitos de relaves en Chile. Guía 4: Marco ambiental y relaves mineros abandonados. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica e Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile.
- Cerrón M. (2011) .Informe de prácticas pre profesionales: “Estudio de la Calidad del suelo de la Minería en Huari - La Oroya”. Huancayo, Perú.
- Doménech, X. (1995). La Química del Suelo. El impacto de los contaminantes, Ed. Mirahuano- Madrid.

- Durán Cuevas, P. A. (2010). Transferencia de metales de suelo a planta en áreas mineras: Ejemplos de los Andes peruanos y de la Cordillera Prelitoral Catalana. (Tesis doctoral) Universidad de Barcelona, España. 180 pg.
- Espinoza Villanueva, V. (2000). Tolerancia a la toxicidad de zinc, cobre y plomo en plantas silvestres asociadas a suelos contaminados por la actividad minera.(Tesis de pregrado) Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- Galán E., Romero A. (2008). Conferencia Contaminación de Suelos por Metales Pesados Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química. Apartado 553. Universidad de Sevilla. Sevilla 41071 Conferencia invitada: Galán y Romero, Macla 48-60. Macla. 10. Revista de la Sociedad Española De Mineralogía.
- García I., Dorronsoro C. (2002). Contaminación por metales pesados. Departamento de edafología y química agrícola de España.
- García & Dorronsoro. (2005). Contaminación por metales pesados. En: Tecnología de Suelos. Recuperado el 24 de mayo del 2013 de: <http://edafoloaia.uqr.es/Revista/tomo9c/paa283.pdf>
- Green, D. (2001). Forestación de depósitos de relave abandonados presentación de caso: Depósito de relave ácido en alta montaña zona central de Chile. Santiago, Universidad de Chile. 156p.
- Guerrero J. B. (2009). Porque debemos evitar pasivos ambientales de las actividades energéticas en el suelo. DGAAE/MINEM. Lima
- Guerrero N. (2010). Contaminantes metálicos en sedimentos y suelos agrícolas generados por actividades mineras en la cuenca del río Rímac. Lima - Perú.

# ANEXOS

## PANEL FOTOGRAFICO

















