



Universidad  
Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de  
Ingeniería Ambiental

**Evaluación de las concentraciones de cadmio  
en las hojas de *maíz* en relación a su  
disponibilidad en suelos de diferente  
pH en el Valle del Mantaro**

**David Edú Cristobal Elescano**

Huancayo, 2017

Tesis para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Ambiental



Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



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

## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, con todas ellas me encuentro en deuda por el ánimo infundido y la confianza en mí depositada, quisiera hacer extensiva mi gratitud

Quiero empezar agradeciendo al laboratorio de la Universidad Continental donde se desarrollaron parte de los análisis de datos, al laboratorio de la Universidad Agraria la Molina donde se ejecutaron las pruebas de cadmio total (suelos, hojas) y al laboratorio de agronomía de la Universidad del Centro donde se efectuaron las pruebas de pH y las comunidades de Sincos, San Lorenzo, Muquiyaayo, Quilcas y Sicaya, que me permitieron extraer las muestras(suelo) para el desarrollo de la Tesis, al Proyecto Mantaro Revive, quienes con el proceso de su investigación aportaron datos fundamentales para el desarrollo del trabajo.

De igual forma agradezco a mi asesor de tesis Ing. Andrés Azabache Leyton quien, con sus conocimientos, apoyo, experiencia y a la vez proporcionándome los datos necesarios para que esta tesis pueda ser concluida, le estaré muy agradecido. A su vez, el presente trabajo no hubiera sido concluido adecuadamente sin la pauta de los catedráticos de la Universidad Continental al Ing. Jacinto Arroyo Aliaga, Ing. Carmencita Lavado Meza y a la Ing. Elizabeth Machuca Manrique, quienes con sus contribuciones y con el ánimo de mejorar la tesis aportaron para que el trabajo resulte de la mejor forma, a todos ellos mi gratitud.

Por último, a mi padre David Cristóbal Carbajal, quien me apoyó en el trabajo de campo en las recolecciones de muestras de suelos, a mi colega José Pacheco Valenzuela quien realizó su colaboración activa para el desarrollo práctico en el laboratorio y la Ing. Sandy García Bendezú quien corroboró la veracidad de los resultados de las muestras de cadmio total (suelo y hojas) en el laboratorio de la Universidad Agraria la Molina.

A mis padres David Mario,  
Amanda Esther y a mi  
hermana Paola por su apoyo  
incondicional.

# ÍNDICE GENERAL

	Página
Agradecimiento.....	ii
Dedicatoria .....	iii
Índice general .....	iv
Índice de tablas .....	vii
Índice de imágenes .....	ix
Índice de gráficos .....	x
Índice de figuras .....	x
Índice de mapas .....	x
Resumen.....	x
Abstract.....	xii
Introducción.....	xiii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	1
1.1 Planteamiento y formulación del problema.....	1
1.1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.1.2 Formulación del problema.....	3
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 General.....	3
1.2.2 Específicos.....	3
1.3 Justificación e importancia.....	4
1.3.1 Justificación de la investigación.....	4
1.3.2 Importancia de la investigación.....	4
1.4 Hipótesis.....	5
1.4.1 General.....	5
1.4.2 Específicas.....	5
1.5 Variables, operacionalización.....	5
1.5.1 Variable dependiente.....	5
1.5.2 Variable independiente.....	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Antecedentes del problema .....	7
2.1.1 Nacionales .....	7

2.1.2 Internacionales .....	7
2.2 Base teórica.....	15
2.2.1 Suelo.....	16
2.2.2 El perfil del suelo.....	16
2.2.2.1 Designación de los horizontes del suelo .....	16
2.2.3 Propiedades físicas del suelo .....	20
2.2.4 Tipos de suelo .....	24
2.2.5 Metales pesados.....	25
2.2.6 Problemática de metales pesados en el ambiente.....	25
2.2.7 Tolerancia de las plantas hacia los metales pesados .....	26
2.2.8 Absorción y transporte de metales en las plantas .....	26
2.2.9 Factores que afectan a la disponibilidad de los metales pesados en las plantas .....	29
2.2.10 El cadmio en el suelo .....	32
2.2.11 Emisiones de cadmio al suelo .....	33
2.2.12 Reacciones del cadmio en los suelos .....	34
2.2.13 Transferencia del cadmio en el sistema suelo – planta .....	36
2.2.14 Efectos del cadmio en la salud humana .....	37
2.2.15 Riesgo ambiental – Movilidad y biodisponibilidad de metales .....	38
2.2.16 La Fito corrección de los suelos contaminados .....	43
2.2.17 Fito extracción de metales pesados .....	44
2.2.18 Fito estabilización de metales pesados .....	45
2.3 Definición de términos básicos .....	47
 CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	48
3.1 Método y alcance de la investigación.....	48
3.1.1 Método de investigación .....	48
3.1.1.1 Método general .....	48
3.1.1.2 Método específico .....	48
3.2 Diseño de investigación .....	68
3.2.1 Diseño preexperimental .....	68
3.2.2 Alcance de la investigación .....	69
3.3 Población y muestra .....	70
3.3.1 Población.....	70

3.3.2 Muestra.....	70
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	71
4.1 Resultados y tratamiento y análisis de la información.....	71
4.1.1 Resultado textural .....	71
4.1.2 Análisis de suelos .....	72
4.1.3 Concentración de cadmio en hojas de <i>maíz (Zea mays)</i> .....	74
4.1.4 Contenido de cadmio en el suelo al final del experimento .....	76
4.1.5 Tasa de transferencia de cadmio del suelo hacia las hojas de <i>maíz (Zea mays)</i> .....	78
4.1.6 Materia seca de la parte aérea.....	80
4.1.7 Materia seca de la raíz.....	81
4.1.8 Altura de planta de <i>maíz (Zea mays)</i> .....	82
4.1.9 Longitud de la raíz.....	84
4.1.10 Correlación y regresión.....	85
4.2 Discusión .....	88
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....	89
Recomendaciones.....	91
Referencias bibliográficas.....	92
ANEXOS.....	103

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Estándares de calidad ambiental para suelo (ECA-Perú).....	6
Tabla 2. Zonas de muestreo .....	49
Tabla 3. Rotulado de muestra.....	53
Tabla 4. Método de análisis de metales en suelo.....	67
Tabla 5. Tratamientos en estudio.....	69
Tabla 6. Resultados de análisis de suelo.....	71
Tabla 7. Resultados de análisis de suelo.....	72
Tabla 8. Resultados del análisis de cadmio en hojas de maíz ( <i>Zea mays</i> ) (mg/kg).....	74
Tabla 9. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Concentración de cadmio en hojas de maíz ( <i>Zea mays</i> ).....	75
Tabla 10. Resultados del análisis de cadmio en el suelo (mg/kg).....	76
Tabla 11. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Contenido total de cadmio en 5 suelos de diferente pH del valle del Mantaro.....	77
Tabla 12. Resultados de la tasa de transferencia de cadmio del suelo hacia las hojas de maíz ( <i>Zea mays</i> ) (%)......	78
Tabla 13. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Tasa de transferencia de cadmio del suelo hacia las hojas de maíz ( <i>Zea mays</i> ).....	79
Tabla 14. Resultados de la materia seca de la parte aérea de maíz ( <i>Zea mays</i> ) (g).....	80
Tabla 15. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Materia Seca de parte aérea de maíz ( <i>Zea mays</i> ).....	80
Tabla 16. Resultados de la materia seca de la raíz de maíz ( <i>Zea mays</i> ) (g).....	81
Tabla 17. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Materia Seca de raíz de maíz ( <i>Zea mays</i> ).....	82
Tabla 18. Resultados de altura de planta de maíz ( <i>Zea mays</i> ) (cm) al final del experimento.....	82
Tabla 19. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Altura de planta de maíz ( <i>Zea mays</i> ).....	83
Tabla 20. Resultados de la longitud de la raíz de maíz ( <i>Zea mays</i> ) .....	84



Tabla 21. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Longitud de raíz de maíz ( <i>Zea mays</i> ).....	84
Tabla 22. Correlación entre la concentración de cadmio en hojas de maíz fd ( <i>Zea mays</i> ) y cadmio disponible en el suelo cadmio inicial y tasa de transferencia de cadmio.....	85
Tabla 23. Análisis de varianza de la regresión entre el pH del suelo y concentración de cadmio en hojas de maíz ( <i>Zea mays</i> ).....	86

## ÍNDICE DE IMÁGENES

	Página
Imagen 1. Horizontes del suelo.....	20
Imagen 2. Zona muestreada Sicaya.....	50
Imagen 3. Toma de muestras compuestas.....	50
Imagen 4. Extrayendo submuestra.....	51
Imagen 5. Recolección muestras compuestas.....	55
Imagen 6. Triturado de muestras grandes.....	55
Imagen 7. Tamizado de suelo.....	56
Imagen 8. Embolsado de muestras.....	56
Imagen 9. Muestras de los suelos.....	57
Imagen 10. Etiquetado de suelos.....	57
Imagen 11. Pesado de muestra.....	58
Imagen 12. Preparado de muestra en vaso metálico.....	58
Imagen 13. Batido de muestra.....	59
Imagen 14. Agitado de muestra.....	60
Imagen 15. Toma de datos de la muestra.....	61
Imagen 16. Segunda toma de datos de la muestra.....	61
Imagen 17. Tamizado de suelo.....	62
Imagen 18. Preparado de plantaciones.....	63
Imagen 19. Unidades experimentales a los 15 días (Quilcas).....	64
Imagen 20. Unidades experimentales a los 15 días (San Lorenzo) .....	64
Imagen 21. Unidades experimentales a los 15 días (Sicaya).....	64
Imagen 22. Unidades experimentales a los 15 días (Muquiyauyo).....	64
Imagen 23. Unidades experimentales a los 15 días (Sincos).....	65
Imagen 24. Secado de la parte aérea de la planta.....	66
Imagen 25. Medición de raíz.....	66
Imagen 26. Muestra del suelo de cada unidad experimental para el envío al laboratorio para el análisis de cadmio total.....	67

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Cinco tratamientos con tres repeticiones.....	68
Gráfico 2. Contenido de cadmio total en suelos de diferente pH del valle del Mantaro.....	73
Gráfico 3. Regresión y correlación entre pH del suelo y concentración de cadmio en hojas de maíz ( <i>Zea mays</i> ).....	87

## ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Clases texturales.....	22
Figura 2. Estructura de la raíz vegetal – Vías de absorción.....	28
Figura 3. Comportamiento de los metales pesados en el suelo.....	39
Figura: 4. Representación esquemática de los distintos mecanismos de fito reacción. El contaminante puede ser estabilizado o degradado en la rizosfera secuestrado o degradado dentro de la planta, o volatilizado.....	43
Figura 5. Patrón de muestreo en cuadrícula.....	49

## ÍNDICE DE MAPA

Mapa 1. Ubicación de los puntos de muestreo Valle del Mantaro.....	48
--	----

## RESUMEN

Durante los meses de agosto a octubre del año 2016 se evaluó el elemento cadmio presente en cinco suelos del valle del Mantaro: Sincos, Muquiyauyo, Quilcas, San Lorenzo y Sicaya, considerando los niveles de contaminación de estos suelos, reportado en el año 2007 por el proyecto Mantaro Revive, con los objetivos de determinar la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*), determinar la disponibilidad de cadmio en el suelo, y relacionar la concentración de cadmio en las hojas y su disponibilidad en suelos de diferente pH. Se trabajó con la capa superficial de los suelos de cada localidad, a través de una muestra compuesta, los cuales fueron dispuestos en un diseño experimental completamente randomizado, con 3 repeticiones, haciendo un total de 15 unidades experimentales. Los resultados permitieron concluir que la concentración de cadmio en las hojas de *maíz* (*Zea mays*) varió de 1.127 mg /kg (suelo de Muquiyauyo, moderadamente alcalino) a 0.418 mg/kg (Suelo de Quilcas, moderadamente ácido), los suelos con más alto pH permiten concentrar más cadmio en las hojas de *maíz* (*Zea mays*), respecto a los suelos con más bajo pH, la disponibilidad de cadmio fue mayor en los suelos de pH ligeramente alcalino (Sincos = 7.96 mg Cd/kg) y moderadamente alcalinos (Muquiyauyo = 6.88 mg Cd/kg), respecto a los suelos ligeramente ácidos (Sicaya = 1.61 mg Cd/kg), moderadamente ácidos (Quilcas = 1.45 mg Cd/kg); y neutros (San Lorenzo = 1.22 mg Cd/kg). Los suelos de Sincos, Muquiyauyo, Quilcas y Sicaya superaron los Límites Máximos Permisibles del ECA de suelos del Perú, y se consideran suelos contaminados con cadmio. La correlación y regresión entre el contenido inicial de cadmio en el suelo y la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*) no fue estadísticamente significativa. El cadmio total disponible en el suelo no predice adecuadamente la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*).

*Palabras clave: cadmio, metales pesados, contaminación de suelos.*

## ABSTRACT

During the months of August to October of 2016, the cadmium element present in five soils of the Mantaro Valley was evaluated: Sincos, Muquiyauyo, Quilcas, San Lorenzo and Sicaya, considering the levels of contamination of these soils, reported in 2007 by The Mantaro Revive project, with the objective of determining the concentration of cadmium in maize leaves, determine the availability of cadmium in the soil, and to relate the concentration of cadmium in the leaves and their availability in soils of different pH. We worked with the surface layer of the soils of each locality, through a composite sample, which were arranged in a completely randomized experimental design, with 3 repetitions, making a total of 15 experimental units. The results showed that the concentration of cadmium in maize leaves varied from 1,127 mg / kg (Muquiyauyo soil, moderately alkaline) to 0.418 mg / kg (Quilcas soil, moderately acid), soils with higher pH allow concentrating More cadmium in corn leaves, the availability of cadmium was higher in soils with slightly alkaline pH (Sincos = 7.96 mg Cd / kg) and moderately alkaline (Muquiyauyo = 6.88 mg Cd / kg), Slightly acid soils (Sicaya = 1.61 mg Cd / kg), moderately acidic (Quilcas = 1.45 mg Cd / kg); And neutral (San Lorenzo = 1.22 mg Cd / kg). The Soils of Sincos, Muquiyauyo, Quilcas and Sicaya, exceeded the Permissible Maximum Limits of ECA of Peruvian soils, and are considered soils contaminated with cadmium. The correlation and regression between the initial cadmium content in the soil and the cadmium concentration in maize leaves was not statistically significant. Total cadmium available in the soil does not adequately predict the concentration of cadmium in corn leaves.

*Key words: cadmium, heavy metals, soil contamination.*

## INTRODUCCIÓN

La absorción de contaminantes del suelo por las plantas cultivadas varía en función de la especie de planta, el tipo de suelo y los factores ambientales, resultando en diferentes concentraciones de elementos en tallos, hojas, frutos y raíces de las plantas. Cuando estas evaluaciones se realizan en los cultivos predominantes en una zona agrícola, pueden estimar las tasas de descontaminación de los suelos, dependiendo del tipo de contaminante.

La contaminación de los suelos por metales pesados ha planteado una amenaza potencial en la producción de cultivos a nivel mundial. De todos los metales, el Cadmio (Cd) ha despertado la preocupación pública debido a su fácil absorción por las plantas y su transferencia a las diferentes partes de la planta (1). Además de los procesos naturales, las adiciones antropogénicas de Cd vía deposición atmosférica y el uso de fertilizantes, residuos de aguas residuales, compost urbano, y lodos industriales son las principales fuentes en suelos agrícolas (2).

En el valle del Mantaro, los suelos están contaminados por metales pesados, como lo reportó el año 2007, el proyecto Mantaro Revive, uno de esos elementos es el cadmio, tóxico para los seres humanos y todo tipo de organismos; desde esa fecha los niveles y extensión de la contaminación deben haber variado, haciéndose necesario evaluar los suelos y cultivos predominantes para proponer medidas de remediación de suelos.

El cadmio es un metal que es de gran importancia en el ambiente, debido a su toxicidad a humanos y animales. Las concentraciones de cadmio pueden acumularse en plantas y no ser tóxicas para ellas, pero son tóxicas para animales que comen esas plantas. La toxicidad de cadmio afecta especialmente a los humanos antes que, a los animales, debido a su longevidad y la acumulación de cadmio en sus órganos por consumir alimentos contaminados por cadmio (3).

Una de las partes vegetativas de acumulación de cadmio lo constituyen las hojas, en el cultivo de *maíz* (*Zea mays*), que se siembra extensamente en el valle del Mantaro, este elemento se concentra en las partes vegetativas de la planta, después de ser absorbido por las raíces, en función de su disponibilidad en el suelo, su tasa de translocación, y su movilidad tanto en el suelo como en la planta, pues generalmente los metales pesados en el

suelo son de lenta movilidad, por estar sujetos a diferentes procesos de retención física (fisuración) o química (quimiosorción), dependiendo de las propiedades del suelo.

La absorción y acumulación de Cd varía no solo entre especies de plantas sino también entre cultivares y genotipos. Para reducir la transferencia de Cd a las partes comestibles de los cultivos, es factible seleccionar los genotipos de baja acumulación. Muchos estudios previos han reportado la variación genotípica de acumulación de Cd en soya (4), trigo (5), *maíz (Zea mays)* (6), girasol (1) y arroz (7). La mayoría de estos experimentos han sido conducidos en cultivos hidropónicos con un nivel simple de Cd, y se han usado plántulas de cultivos.

El pH y la materia orgánica son dos de los más importantes factores del suelo que controlan la disponibilidad de cadmio (8). La disponibilidad del elemento químico está referida para los receptores vivos (por ejemplo, raíces de las plantas) a través del contacto directo o absorción (9). Diversos trabajos de investigación confirman que el pH es uno de los más importantes factores, que controla la absorción de metales pesados (10).

Se planteó en el presente estudio evaluar la concentración de cadmio en las hojas de *maíz (Zea mays)*, a nivel experimental, se utilizaron suelos del valle del Mantaro, de cinco diferentes localidades, que tuvieron diferente pH, por ser uno de los factores del suelo que influye en su disponibilidad y absorción de la planta.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

### 1.1 Planteamiento y formulación del problema

#### 1.1.1 Planteamiento del problema

Durante los últimos años, se ha incrementado el interés en relación a la acumulación de metales pesados en los ecosistemas terrestres. La contaminación del suelo, componente de los ecosistemas, se ha incrementado en el mundo y tiene un riesgo a largo plazo sobre la salud del ecosistema. El suelo puede afectar la salud humana de diferentes maneras, especialmente a través de los canales alimenticios, donde el cuerpo humano ingiere alimentos y agua que provienen de suelos contaminados. Los metales pesados, como el cadmio, pueden acumularse en el cuerpo humano y ser tóxicos.

El *maíz (Zea mays)*, es un cultivo muy importante en el distrito El Mantaro, por su gran área cultivada, siendo fuente alimenticia de los pobladores del lugar, así como de las personas de la capital de la República, Lima, donde es comercializado. Su consumo humano a través de choclo o *maíz (Zea mays)*, se complementa con el forraje que se dispone de los residuos de cosecha, para los animales.

Este cultivo se desarrolla en suelos contaminados del distrito El Mantaro, según datos del año 2007, a través de la publicación de resultados



del proyecto Mantaro Revive, donde el cadmio total en suelos agrícolas superó los límites permisibles del ECA (Estándar de Calidad Ambiental), de Canadá, porque a esa fecha no estaba publicado el ECA Suelos del Perú.

Este metal pesado en el suelo, tiene diferentes mecanismos de interacción con la fase sólida y líquida, siendo los componentes inorgánicos (minerales), así como el pH y la fracción orgánica, los determinantes en su contenido, que cuando es alta, favorece la absorción de la planta y consecuentemente su disminución en el suelo.

En un experimento de una parcela en el campo sobre la contaminación de microelementos (aluminio, arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc) se inició en 1994 en Hungría, en la Granja Modelo de Tasspuszta, del Gyongyos College. Las plantas experimentales fueron trigo de invierno (*Triticum aestivum* L. emend. Fiori et Pool.) en 1995, maíz (*Zea mays*) (*Zea mays* L.) en 1996, y girasol (*Helianthus annuus* L.) en 1997. Las muestras de plantas fueron tomadas cada año durante el periodo vegetativo en fenofases caracterizadas por absorción intensiva de nutrientes. La acumulación de cadmio fue significativa en partes vegetativas y reproductivas de los cultivos con el incremento de cadmio en el suelo. El contenido de cadmio fue casi 10-40 veces más en semillas de girasol tratadas que en el control; como resultado, las semillas no fueron adecuadas para el consumo. El cadmio puede acumularse en el tejido reproductivo, y se constituye en un riesgo real en la cadena alimenticia (11).

En este contexto, se propuso evaluar el contenido de cadmio en plantas de maíz (*Zea mays*), que se desarrollaron en suelos de diferente pH y relacionarlo con su contenido total en el suelo.

### **1.1.2 Formulación del problema**

#### **a) Problema general**

- ¿Cuál es la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*) y su relación con la disponibilidad en suelos de diferente pH en el valle del Mantaro?

#### **b) Problemas específicos**

- ¿Cuál es la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*) en suelos de diferente pH del valle del Mantaro?
- ¿Cómo varía la disponibilidad de cadmio en suelos de diferente pH en el valle del Mantaro?
- ¿Cuál es la relación entre cadmio en las hojas de *maíz* (*Zea mays*) y la disponibilidad de cadmio en el suelo?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

Determinar la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*) y relacionarla con la disponibilidad en suelos de diferente pH del valle del Mantaro.

### **1.2.2 Específicos**

Determinar la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*) en suelos de diferente pH del valle del Mantaro.

Determinar la disponibilidad de cadmio en suelos de diferente pH del valle del Mantaro.

Relacionar la concentración de cadmio en las hojas de *maíz* (*Zea mays*) y su disponibilidad en suelos de diferente pH.

## **1.3 Justificación e importancia**

### **1.3.1 Justificación de la investigación**

La absorción de cadmio por las plantas cultivadas disminuye la concentración de contaminantes en el suelo, en función de las características del suelo contaminado y se constituye en una técnica de remediación; después de lo cual las plantas desarrolladas en suelos contaminados deben ser tratadas para evitar que el ciclo de contaminación continúe a través de la cadena alimenticia.

Al determinar la relación existente entre la concentración de cadmio en las hojas de la planta y su disponibilidad en el suelo, se establecerán las características del modelo de relación entre estas variables, que permitirá aplicarla a condiciones similares, de suelos y plantas.

### **1.3.2 Importancia de la investigación**

El cadmio es un metal pesado tóxico para los seres vivos cuando se encuentra en altas concentraciones en el suelo, y su disminución a través de la absorción de la planta, favorecerá la remediación del suelo.

Los suelos en los que los contaminantes están en bajas concentraciones, por debajo de los límites permisibles establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental, tendrán menor potencial de contaminar a los seres humanos que consumen las partes cosechables del maíz (*Zea mays*) (*Zea mays* L.), no solo en nuestra región sino en el país.

La bioacumulación de cadmio en el medio ambiente ocurren en los tres principales medios naturales, (aire, agua y suelo) y son muy variables; sin embargo, el grado de biodisponibilidad y el potencial de efectos varían dependiendo de la forma de cadmio; el cadmio se bioacumula principalmente en los riñones y el hígado de los vertebrados y los invertebrados acuáticos y algas. (35)

## **1.4. Hipótesis**

### **1.4.1 General**

- Existe una relación directa entre la concentración de cadmio en hojas de *maíz (Zea mays)* y la disponibilidad en suelos de diferente pH en el valle del Mantaro.

### **1.4.2 Específicas**

- Existe una concentración alta de cadmio en suelos de diferente pH del valle del Mantaro.
- Existe una disponibilidad baja de cadmio al disminuir el pH de los suelos del valle del Mantaro.
- Existe una baja relación entre el cadmio en hoja y la disponibilidad en los suelos del valle del Mantaro.

## **1.5. Variables, operacionalización**

### **1.5.1 Variable dependiente**

Y = Concentración de cadmio de las hojas en la planta de *maíz (Zea mays)* del Valle del Mantaro.

#### **Indicadores:**

1. Análisis del contenido de cadmio en (mg/kg) en las hojas de la planta de *maíz (Zea mays)*.

### **1.5.2 Variable independiente**

X= Concentración de cadmio en suelos de diferente pH del valle del Mantaro.

**Indicadores:**

1. Análisis del contenido de Cd en (mg/kg) en suelos de diferente pH del Valle del Mantaro

Tabla 1. Estándares de calidad ambiental para suelo (ECA-Perú).

Parámetros inorgánicos	Suelo agrícola
Cadmio total (mg/kg)	1.4

Fuente: MINAM. 2013. DS N° 002-2013-MINAM. Estándares de calidad ambiental para suelo.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes del problema

##### 2.1.1 Nacionales

En el trabajo titulado: “Efecto de la materia orgánica y fuentes de cal en la toxicidad de cadmio en *maíz (Zea mays)*”, se optó por determinar los niveles críticos de cadmio que causan efecto al *maíz (Zea mays)* a través del tiempo, basándose en un ensayo preliminar, en el cual se hicieron tres siembras: 0-30-90 días después de la contaminación. Los niveles fueron 0-50-100-150-200-250 y 300 mg Cd/kg de suelo. Los resultados obtenidos muestran que, donde se hizo la aplicación de cadmio, las dosis de 50 y 100 mg Cd/kg de suelo fueron los más representativos en la producción de materia seca, del promedio entre tratamientos de las tres épocas de siembra; mientras que el promedio mayor entre época de siembra se obtuvo a los 90 días después de la contaminación con cadmio. En la segunda fase se trabajó con niveles de 50 y 100 mg Cd/kg de suelo con 18 tratamientos, aplicando compost (2%) y las fuentes de calcio. La mejor fuente de calcio la obtuvo el tratamiento en que se hizo la combinación, aumentando su peso foliar (3.56 g) en comparación con el tratamiento que no se le hizo aplicación de ninguna fuente. Mientras que con la aplicación de materia orgánica las plantas incrementaron su peso seco, tanto en la parte foliar (37.53 g) como en raíz

(14.78 g). Con la aplicación de calcio se redujo la absorción de cadmio en forma significativa. Para ambas fases se trabajó con un Diseño Completo al Azar (DCA) con la prueba de significación de Duncan al 0.05% (12).

En el trabajo de tesis titulado: “Fuentes fosfatadas en dos suelos en la concentración de cadmio foliar en *maíz* (*Zea mays*) bajo condiciones de invernadero”, con los objetivos de establecer el efecto de la aplicación de diferentes fertilizantes fosfatados en la absorción de cadmio por plantas de *maíz* (*Zea mays*), determinar el efecto de distintos niveles de fósforo aplicado en la absorción de cadmio por plantas de *maíz* (*Zea mays*) y evaluar el efecto de dos tipos de suelo, sobre la absorción de cadmio por plantas de *maíz* (*Zea mays*). Los tratamientos considerados fueron dos fuentes de fósforo (fosfato diamónico y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico), en tres dosis (50 ppm, 100 ppm y 200 ppm) interaccionando con dos tipos de suelo (franco arenoso y arenoso), dispuestos en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2x3x2 con dos testigos adicionales. Los resultados mostraron un incremento de la materia seca conforme se incrementaron los niveles de fósforo, logrando una mayor producción de materia seca con la aplicación de 200 ppm de P, siendo la fuente fosfato diamónico la que mayor acumulación de materia seca presentó, así como el suelo arenoso. En cuanto a la extracción total de cadmio, se observó que esta se relaciona directamente con la cantidad de fertilizante fosfatado aplicado. El tratamiento sin aplicación de fósforo y con roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico como fuente de P, fueron los tratamientos que mostraron las menores extracciones de cadmio por el cultivo. La aplicación de fosfato diamónico fue el tratamiento que mostró la mayor extracción total de cadmio en las plantas de *maíz* (*Zea mays*). Asimismo, bajo el suelo arenoso usado como sustrato, la presencia de cadmio en los tejidos del cultivo se incrementó. (13)

Se reportó que en el Valle del Mantaro se ha evidenciado concentraciones de cadmio en dos áreas de monitoreo, ubicados en los distritos de Orcotuna, Concepción y El Mantaro, Jauja; donde las concentraciones de este metal superan en 9.5 y 13.5 veces el ECA de Canadá, en ambos casos las áreas son regadas por el río Mantaro. Además, se

menciona que los resultados publicados, corresponden a data de muestreo superficial, y por lo tanto son suelos que pueden estar en directo contacto con personas, animales y plantas. Se concluye que los suelos regados con aguas del río Mantaro evidencian altos contenidos de los metales analizados. (14)

### 2.1.2 Internacionales

En el trabajo de investigación titulado: “The potential of Corn (*Zea mays*) for Phytoremediation of Soil Contaminated with Cadmium and Lead”, se tomó muestras de suelo de 0-20 cm de profundidad, de la provincia de Chaharmahal Bakhtiari en el oeste de Irán. Se sembró *maíz* (*Zea mays*) en macetas que contenían 3 kg de estos suelos. El experimento consistió de 9 tratamientos incluyendo suelo sin cadmio y plomo (T1), suelo contaminado con una concentración de cadmio de 2 mg/kg (T2), suelo contaminado con 4 mg/kg de concentración de cadmio (T3), suelo contaminado con 8 mg/kg de concentración de cadmio (T4), suelo contaminado con 16 mg/kg de concentración de cadmio (T5), suelo contaminado con 6 mg/kg de concentración de plomo (T6), suelo contaminado con 12 mg/kg de concentración de plomo (T7), suelo contaminado con 18 mg/kg de concentración de plomo (T8) y suelo contaminado con 24 mg/kg de concentración de plomo (T9). Las muestras fueron analizadas después de 60 días. Las características físicas y químicas del suelo como textura, capacidad de intercambio de cationes, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y cadmio y plomo extractable fueron medidos antes y después del ensayo. Las evidencias proporcionadas por este experimento indicaron que el *maíz* (*Zea mays*) es una planta acumuladora efectiva para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio y plomo. Los datos encontrados para raíz fueron de 5.1913 mg Cd/kg (T2), 8.6906 mg Cd/kg (T3), 15.4127 mg Cd/kg (T4) y 9.7215 mg Cd/kg (T5); para tallos fueron: 1.3305 mg Cd/kg (T2), 2.791 mg Cd/kg (T3), 3.512 mg Cd/kg (T4) y 5.5304 mg Cd/kg (T5), demostrando mayor acumulación de cadmio en raíz en comparación con el tallo. Todos los tratamientos fueron estadísticamente diferentes. (15)



En el trabajo de investigación titulado: “Chromium, Nickel, Cadmium, and Lead Accumulation in Maize, Sunflower, Willow, and Poplar”, con los objetivos de: (i) evaluar y comparar la acumulación de metales pesados (cadmio, cromo, níquel, y plomo) por plantas de alta producción de biomasa, como son *maíz* (*Zea mays*) (*Zea mays* L.), girasol (*Helianthus annuus* L.) y árboles de rápido crecimiento, como son el sauce (*Salix x smithiana* Willd.), y álamo (*Populus nigra* L. x *P. maximowiczii*) en suelos contaminados con estos elementos, y (ii) hallar una relación entre los contaminantes en suelos y plantas para localidades específicas caracterizadas por el contenido heterogéneo de elementos del suelo. El experimento fue realizado en un suelo contaminado en Hradec Kralove (República Checa). Las muestras de suelo y planta fueron colectadas de tres parcelas con diferente contenido de elementos (altas cantidades de Cd, Cu, Hg, Zn, Cr, Ni y Pb). Se investigó la cantidad total y disponible de concentraciones de metales en el suelo. Solo una pequeña porción de los elementos fue disponible para las plantas (6% Ni, 14% Cd, 1.3% Pb, y menos de 1% de Cr). La más alta concentración de cadmio fue hallada en hojas de sauce (1.87 mg Cd/kg) y raíces de sauce (3.05 mg Cd/kg). Los resultados también indicaron que la translocación de Cr, Ni, Cd y Pb desde las raíces a la parte aérea de la planta de sauce y álamo fue baja (89-98% de los elementos fueron retenidos en las raíces). La más alta translocación desde las raíces de las plantas a la parte aérea de *maíz* (*Zea mays*) y girasol fue hallada en el caso de Cd y Pb (57 y 83% de Cd, 56 y 76% de Pb). (16)

En la investigación titulada “Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.), se tuvo como objetivo analizar las acumulaciones de cadmio en raíces y tallos y las interacciones con otros metales (Mn, Fe, Cu y Zn). Las concentraciones utilizadas de cloruro de cadmio variaron de  $10^{-4}$  M a  $10^{-6}$  M. El Cd tuvo efectos estimulatorios durante los 5 primeros días sobre la longitud de raíz de Nongda N° 108 a concentraciones de  $10^{-6}$  M a  $10^{-5}$  M. Las plántulas expuestas a una solución  $10^{-4}$  M de Cd exhibieron una sustancial reducción del crecimiento y el crecimiento de la raíz se detuvo. El crecimiento de la raíz de Liyu N° 6 fue

estimulada a concentraciones de  $10^{-5}$  M y  $10^{-6}$  M Cd durante todo el experimento (15 días). El Cd inhibió el crecimiento de la raíz de Liyu N° 6 a  $10^{-4}$  M de Cd después de 10 días de tratamiento. La acumulación de Cd en las raíces y tallos de los dos cultivares incrementó significativamente ( $P < 0.05$ ) con el incremento de la concentración de cadmio y duración del tratamiento. El cadmio se concentró principalmente en las raíces, y pequeñas cantidades fueron transferidas a los tallos. La proporción de cadmio en las raíces de Nongda N° 108 disminuyó con el incremento en las concentraciones de cadmio y duración del tratamiento, excepto para el grupo expuesto a  $10^{-4}$  M de Cd. En Liyu N° 6, la proporción de cadmio en las raíces disminuyó progresivamente con el incremento de las concentraciones de cadmio. Liyu N° 6 tuvo una mayor habilidad para remover cadmio de la solución y acumularlo cuando fue comparado con Nongda N° 108. Liyu N° 6 puede ser considerado un hiperacumulador de cadmio, según el dato comúnmente aceptado de concentración de tallos que define hiperacumulación como 0.01% (m/m) para cadmio. Este cultivar, produce muchas raíces y una gran biomasa y con gran habilidad para acumular cadmio, puede jugar un rol importante en el tratamiento de suelos contaminados con cadmio. (17)

En el trabajo de investigación titulado “Cadmium uptake in field pea cultivars grown under French and Swedish conditions” se evaluó la respuesta de arveja, *Pisum sativum*, al cadmio (Cd) en el suelo, usando 24 cultivares de arveja y 11 localidades situadas en Francia y Suecia. Los granos tuvieron un contenido promedio de cadmio de 0.036 ppm. La absorción promedio de Cd de los cultivares individuales de arveja no se diferenciaron entre localidades. El cultivar Laser tuvo la más alta absorción promedio, 0.066 ppm de cadmio, mientras que el cultivar Callisto tuvo la más baja absorción, 0.021 ppm de cadmio. El promedio de absorción más alto de cadmio se alcanzó en el campo con el segundo nivel más alto de cadmio (0.39 ppm en el suelo). El más bajo promedio de absorción de cadmio fue obtenido en el campo con el tercer contenido de cadmio más alto (0.32 ppm). No existieron diferencias entre las localidades francesas y suecas con respecto a la absorción de cadmio en la arveja. Todos los cultivares investigados respondieron en términos de

absorción de cadmio a las diferencias en la exposición al cadmio presente en las diferentes localidades. Los investigadores sugirieron que las diferencias en el material genético podrían ser cuidadosamente investigadas y explotada para mejorar la tolerancia a la exposición de cadmio. Este estudio demostró que la absorción de cadmio en arveja no depende de los niveles químicos de cadmio en el suelo, como ha sido el caso de los bajos niveles de cadmio en los suelos del presente estudio. (18)

En el trabajo de investigación titulado: “Adsorption and Desorption of Native and Added Cadmium in Relation to Properties of Some Alluvial Soils in Punjab”, se examinaron la adsorción y desorción de cadmio (Cd) en relación a las propiedades del suelo en 24 suelos superficiales colectados de diferentes localidades en Punjab. Los suelos variaron ampliamente en propiedades fisicoquímicas como capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido de arcilla, contenido de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), contenido de materia orgánica, conductividad eléctrica (CE) y pH. El Cd extractado con ácido dietilentriamina pentaacético de los suelos del experimento varió de 0.024 a 0.054  $\mu\text{g Cd.g}^{-1}$  de suelo, mientras que el Cd total varió de 0.9 a 2.25  $\mu\text{g Cd.g}^{-1}$  de suelo. Para la adsorción de Cd las muestras de suelo fueron agitadas con 0.01 M  $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2]$  conteniendo 20 mg de  $\text{Cd.mL}^{-1}$  hasta que se obtuvo el equilibrio. La desorción de Cd fue realizada por lavados repetidos de los suelos con solución 0.01 M de  $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2]$  con Cd libre. La cantidad de Cd adsorbido varió de 267.5 a 446.3  $\mu\text{g Cd.g}^{-1}$  suelo, lo cual representa 53.5 a 89.3% del Cd inicialmente agregado. La adsorción de Cd estuvo significativamente correlacionada con CIC, contenido porcentual de arcilla, CE, contenido de  $\text{CaCO}_3$  y pH del suelo. La regresión lineal múltiple explicó el 41% de la variación total en adsorción de Cd en términos de CIC, mientras que la CIC, pH y materia orgánica, juntos, hicieron la predicción del 73% de variación en la adsorción de Cd. El Cd adsorbido estuvo correlacionado negativamente y significativamente con el Cd acumulado desorbido y % de Cd desorbido. La desorción de Cd nativo del suelo fue imperceptible. La cantidad y patrón de desorción varió con las propiedades del suelo. Casi el 12.6 al 41.2% del cadmio adsorbido podría ser desorbido a la solución suelo

después de seis pasos consecutivos de desorción. El porcentaje de cadmio desorbido estuvo significativamente correlacionado con pH, CE, CaCO<sub>3</sub>, CIC y contenido de arcilla. El carbonato de calcio, la CIC, y el pH explicaron el 69% de variación de desorción porcentual de cadmio. (19)

En el trabajo de investigación titulado: “Content, Distribution, and Solubility of Cadmium in Arables and Forest Soils” se determinó la concentración de Cadmio (Cd) en el suelo y solución suelo en 11 pares de perfiles de suelos arables y forestales de Dinamarca que representaron 3 diferentes clases texturales (arena, arena franca y franco arenoso). Estos autores proponen que la forestación de tierras agrícolas disminuye el pH del suelo e incrementa la solubilidad de Cd en el suelo, lo cual causa la lixiviación de Cd a ríos y capas freáticas. Los resultados indicaron que el pH del suelo no cambió o disminuyó con la profundidad en los suelos arables, pero incrementó con la profundidad en los perfiles forestales. Se encontró contenidos significativamente altos de Cd en los 30 cm superiores de los suelos arables comparados con el de los suelos forestales. Las concentraciones totales de Cd en el suelo correlacionaron con la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), contenido de arcilla, y contenido de materia orgánica, pero no con el pH del suelo. El pH de la solución suelo no cambió o disminuyó con la profundidad de los perfiles arables, pero incrementó con la profundidad en los perfiles forestales. La concentración de Cd en la solución suelo fue significativamente mayor en los suelos forestales que en los suelos arables. La concentración de Cd en la solución suelo disminuyó conforme el pH se incrementó. Las concentraciones de Cd en el suelo y la solución suelo fueron mayores en los suelos franco arenosos comparados con las arenas francas y arenas. Se concluyó que la forestación puede conducir a mayores concentraciones de Cd en la solución suelo conforme disminuye el pH y la disminución de la CICE disminuye la retención de Cd y reduce la concentración de Cd en la capa superficial de suelos forestales. (20)

En el trabajo de investigación titulado: “Fijación y movilidad de cadmio y zinc en tres tipos de suelos ácidos de Galicia, España. Se determinó

la retención y la movilidad de Cd y Zn se estudiaron en tres suelos ácidos de Galicia, España los suelos fueron tratados con 500 mg kg<sup>-1</sup> de cadmio, 1000 mg kg<sup>-1</sup> de zinc y una mezcla de ambos elementos.

El contenido total de ambos metales se determinó por digestión ácida usando un horno de microondas, y sus contenidos disponibles por NH<sub>4</sub>COO CH<sub>3</sub> extracción. Se encontraron diferencias significativas en los tres suelos. Se encontró una retención más fuerte en el suelo con mayor contenido de materia orgánica, textura más fina, una capacidad de intercambio catiónico más efectiva y un menor porcentaje de saturación de Al. La movilidad de Zn era mayor que la movilidad de Cd en los tres suelos. La alta concentración de uno de los metales favorece la movilidad e inhibe la retención del otro. (21)

En el trabajo de investigación titulado: “Respuesta del maíz (*Zea mays*) en suelos contaminados por metales pesados después de crecer una comunidad de pasto”, se realizó un bioensayo en mesocosmos en condiciones controladas (15°C -25°C, 60%-70% de humedad) durante tres meses. Los suelos utilizados procedieron de las muestras medias recogidas en cada uno de los 30 lugares seleccionados de los tres emplazamientos de minas abandonadas, y después de haber cosechado dos veces durante dos años las plantas crecidas a partir del banco de semillas. El mesocosmos es una cubeta de plástico de 30 cm x 21 cm x 6 cm según se argumentó en (22); en cada uno se plantaron 5 plántulas de maíz comercial procedentes de semillas previamente germinadas en cámara de crecimiento. Se dispusieron tres réplicas por suelo y control (procedente de un cultivo del mismo territorio y sin importantes contenidos de metales), y se regaron con 200 ml agua desionizada cada 48 h. Los suelos son franco-arenosos y no se tamizaron para evitar perder agregados y banco de semillas. Se determinó el pH en pasta saturada, la materia orgánica por oxidación con dicromato potásico, el contenido pseudototal de metales (ICP-OES previa extracción con HNO<sub>3</sub>; y HCl proporción 4:1 según (22), y total de As por fluorescencia de rayos X. Al finalizar el bioensayo, las plantas se lavaron con agua desionizada, separadamente la parte aérea de la radicular, se secaron en estufa (70°C, 48 h), y se analizaron los metales mediante ICP-OES previa digestión con HNO<sub>3</sub>

y HC<sub>1</sub>. Se realizaron correlaciones de Pearson entre los datos con el programa SPSS 19. En los resultados se observaron, a pesar de haber crecido la comunidad vegetal en el suelo durante dos años, con la correspondiente absorción de elementos del suelo, los metales persisten en los mismos y son capaces de acumularse en el maíz, mayormente en las raíces, pero una parte importante también llega a las hojas, que son la parte principalmente consumida por el ganado. En más del 30% de los casos analizados, Cd, As, Cu, Mn, Pb y Zn se encuentran en las hojas en cantidades superiores a los niveles de referencia para alimentos según la OMS. En el caso de los tres últimos metales, este porcentaje asciende a más del 85%. En ningún caso, la cantidad de Ni y Cr en partes aéreas excede estas referencias. Esto indica que Mn, Pb y Zn, seguidos de Cu, son los metales que pueden suponer un mayor riesgo para la salud de herbívoros que se alimenten de ese maíz forrajero. También los resultados reflejaron que las hojas del maíz acumulan elevada dosis de metales cuando este cultivo crece en suelos contaminados por los mismos. Esto hace que se piense en el maíz como una planta acumuladora especialmente de Cd, As, Cu, Mn, Pb y Zn, y se hable de ella para fines de fitorremediación de suelos contaminados por dichos metales. Por otra parte, la facilidad para acumular otros elementos en las raíces (especialmente Al, Zn, Pb y As en suelos ácidos y Cd en los básicos), hace que el maíz sea también candidata a la fitoestabilización de los mismos. Aunque esta faceta remediadora del maíz está siendo ampliamente estudiada (23), no podemos llevar a cabo dichas acciones sin asegurarnos que el maíz no va a ser utilizado como forraje, sino únicamente con fines remediadores.

## **2.2. Base teórica**

### **2.2.1 Suelo**

El término suelo se refiere al material exterior, poco compacto, de la superficie terrestre; uno de sus componentes principales es la fracción mineral, esta proviene del material parental y es el producto de la desintegración de las rocas provocada por el intemperismo físico, químico y bioquímico. La fracción mineral del suelo está constituida por partículas de

diferentes tamaños: arena (200-20 micras), limo (20-0 micras) y arcilla (menos de 2 micras). La cantidad de cada uno de los componentes de esta fracción varía de un suelo a otro y depende directamente del material de origen a la proporción relativa de arena, limo y arcilla expresada en porcentaje, se le conoce como textura del suelo. (24)

## **2.2.2 El perfil del suelo**

### **2.2.2.1 Designación de los horizontes del suelo**

La designación de los horizontes del suelo, resume muchas observaciones de la descripción del suelo y da una impresión acerca de los procesos genéticos que han formado el suelo bajo observación. En este capítulo se presentan, la morfología del suelo y otras características descritas por horizonte. Los símbolos de los horizontes consisten de una o dos letras mayúsculas para el horizonte mayor y letras minúsculas para las distinciones subordinadas, con o sin figura de sufijo. Para la presentación y comprensión de la descripción del perfil del suelo, es esencial dar el símbolo correcto a cada horizonte. Horizontes y capas mayores, las letras mayúsculas H, O, A, E, B, C, R, I, L y W representan a los horizontes mayores o capas de suelos o asociados con suelos (imagen1). Las letras mayúsculas son los símbolos base a los cuales se añaden otros caracteres con el fin de completar la designación. A la mayoría de horizontes y estratos se les asigna una letra mayúscula, pero algunos requieren dos. Actualmente, se reconocen diez horizontes mayores y estratos, y siete horizontes transicionales. Los horizontes maestros y sus subdivisiones representan capas o estratos que muestran evidencia de cambio y algunos estratos que no han cambiado. La mayoría son horizontes de suelo genéticos, que reflejan una valoración cualitativa acerca del tipo de cambios que han sucedido. Los horizontes genéticos no son equivalentes a los horizontes diagnóstico, aunque pueden ser idénticos en los perfiles de suelos. Los horizontes diagnósticos son rasgos u objetos definidos

cuantitativamente con fines de clasificación. Se identificaron tres capas o estratos adicionales y que están relacionados con suelos, estos son: I para hielo, L para materiales límnicos y W para agua.

**a) Horizontes A**

Estos son horizontes minerales que se formaron en la superficie del suelo o por debajo de un horizonte **O**, en el que toda o parte de la estructura de la roca original ha sido desintegrada y están caracterizados por uno o más de los siguientes puntos: una acumulación de materia orgánica humificada íntimamente mezclada con la fracción mineral y que no despliega propiedades características de los horizontes **E** o **B** (ver abajo); propiedades resultado de la labranza, pastoreo, o tipos similares de perturbación; una morfología que es diferente del horizonte **B** o **C** subyacente, resultado de los procesos relacionados con la superficie. Si un horizonte superficial (o epipedón) tiene propiedades de ambos horizontes **A** y **E**, pero el rasgo dominante es la acumulación de materia orgánica humificada, se le denomina horizonte **A**. En algunos lugares, cuando prevalecen climas calientes y áridos, el horizonte superficial no disturbado es menos oscuro que el horizonte subyacente y contiene pequeñas cantidades de materia orgánica. Tiene una morfología distinta del horizonte o capa **C**, aunque la fracción mineral puede ser inalterada o solo levemente alterada por intemperización. Este tipo de horizonte se designa como **A** porque se encuentra en la superficie. Ejemplo de epipedones que tienen estructura o morfología diferente que deben esa característica a procesos superficiales son: los vertisoles, suelos en panes o playas con vegetación escasa, y suelos de los desiertos. Sin embargo, los depósitos aluviales o eólicos recientes que retienen estratificación fina, no son considerados como horizonte **A**, al menos que estos sean labrados. (25)



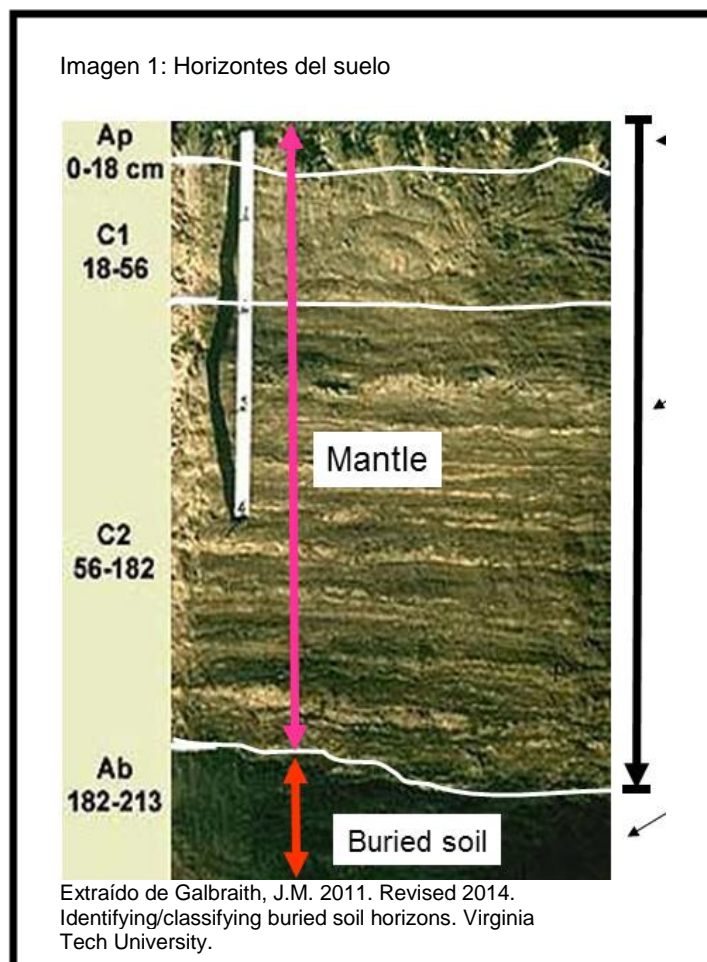
#### **b) Horizontes B**

Estos son horizontes que han sido formados por debajo de un horizonte **A**, **E**, **H** u **O**, y en el que los rasgos o elementos dominantes son la obliteración o desintegración de toda o la mayoría de la estructura rocosa original, junto con una o la combinación de: concentración iluvial, individual o en combinación de arcilla silicatada, hierro, aluminio, humus, carbonatos, yeso o sílice; evidencia de remoción de carbonatos; concentración residual de sesquióxidos; revestimientos de sesquióxidos que hacen al horizonte conspicuamente bajo en valor, más alto en croma, o más rojo en el matiz que los horizontes suprayacente y subyacente sin aparente iluviación de hierro; alteración que forma silicatos de arcilla o libera óxidos o ambos, y que forma una estructura granular, blocosa o prismática, si los cambios de volumen acompañan cambios en el contenido de humedad; fragilidad, todos los tipos de horizontes **B** son o fueron originalmente horizontes subsuperficiales. Incluidos como horizontes **B** se encuentran las capas de concentración iluvial de carbonatos, yeso o sílice que son resultado de procesos pedogenéticos (estas capas o estratos pueden o no estar cementados) y capas frágiles que tienen otra evidencia de alteración, como la estructura prismática o la acumulación iluvial de arcilla. Algunos ejemplos de capas o estratos que no son horizontes **B**, son: capas en las que las películas de arcilla recubren fragmentos rocosos o se encuentran sobre sedimentos estratificados finos no consolidados, cuando las películas fueron formadas *in situ* o por iluviación; capas o estratos donde los carbonatos han sido iluviados pero que no son contiguos a un horizonte genético suprayacente; y capas con propiedades gléyicas, pero sin otros cambios pedogenéticos. (25)

#### **c) Horizontes o capas C**

Estos son horizontes o capas, excluyendo la roca madre dura, que han sido afectados por los procesos pedogenéticos de manera mínima y no poseen las propiedades de los horizontes **H**, **O**, **A**, **E** o **B**. La mayoría son estratos o capas minerales; sin embargo, se

incluyen algunos estratos silicios y calcáreos como conchas marinas, residuos corales y diatomáceos. El material de los horizontes **C** puede o no ser parecido a aquel que se formó en el solum. Un horizonte **C** puede haber sido modificado aún si no existe evidencia de ningún proceso pedogenético. Las plantas de las raíces pueden penetrar los horizontes **C**, proveyendo un medio de crecimiento importante. Se incluyen como horizontes **C**, los sedimentos, saprofita y la roca madre en estado no consolidado, así como otros materiales geológicos que se saturan comúnmente dentro de 24 horas cuando el aire se seca o cuando se sitúan trozos de secado dentro del agua y cuando el material rocoso en condición húmeda puede ser atravesado por una pala. Algunos suelos forman material que ya se encuentra altamente intemperizado; este material no reúne los requisitos de los horizontes **A**, **E** o **B**, por lo que se le designa como horizonte **C**. Los cambios que no se consideran pedogenéticos, son aquellos no relacionados con los horizontes suprayacentes. Los horizontes o capas que contienen sílice, carbonatos o yeso, aun si están cementados pueden ser incluidos como horizontes **C**, al menos que el horizonte esté afectado por procesos pedogenéticos; caso en el que sería considerado horizonte **B**. (25)



### 2.2.3 Propiedades físicas del suelo

Los suelos contienen propiedades físicas las cuales son:

- **El color**

Generalmente los de color oscuro son más ricos en materia orgánica, mientras los colores pardos, rojizos y amarillentos indican que los suelos son bien aireados y no se encharcan, aquellos que presentan colores grises y manchados de verde azulado indican que los suelos permanecen mucho tiempo encharcados. (26)

- **Textura**

Es la proporción de las distintas partículas minerales del suelo, clasificadas (figura 1) según su tamaño de grano en tres grupos: arenas, limos y arcillas, es decir, la textura de un suelo se define por las proporciones de arena, limo y arcilla que posee (arenas 2mm – 0,02 mm;

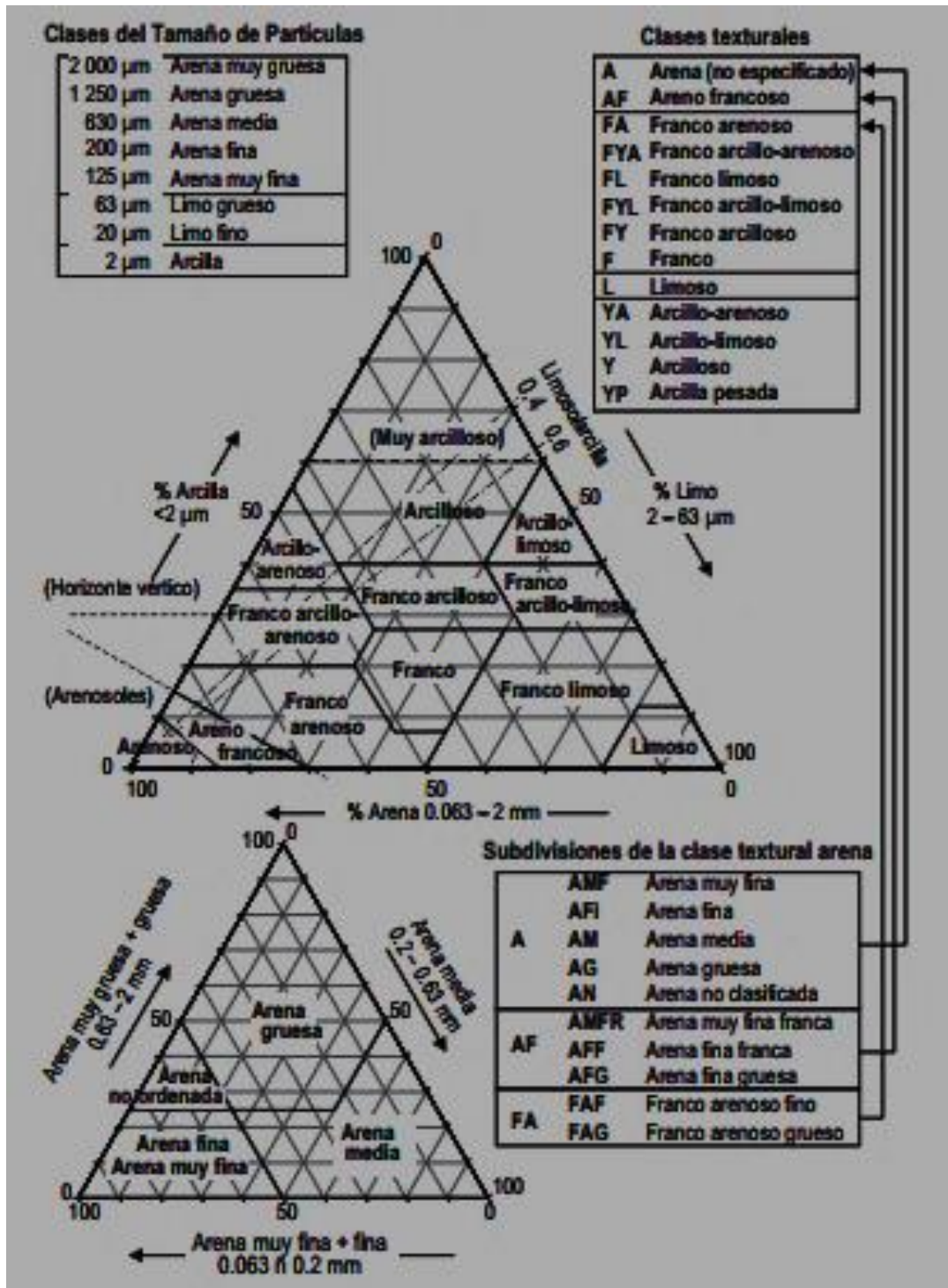
limos 0,02 – 0,002, arcillas < 0,002mm). La textura es un factor muy importante en las características del suelo como la permeabilidad, aireación y la capacidad de retención del agua y de nutrientes. En función del tipo y tamaño de partículas presentes en un suelo, la capacidad de adsorción de moléculas polares e iónicas varía considerablemente. Otros efectos dependientes de la textura son la plasticidad y la cohesión. (26)

- **Tipos**

Cuando abundan mucho las partículas de tamaño arena se dice que el suelo tiene textura arenosa; si son los limos, textura limosa; y si son las arcillas, textura arcillosa.

Un suelo con mezcla de los tres componentes se llama textura franca y es lo más beneficioso, pues un suelo que posea fracciones gruesas y finas en proporciones adecuadas es un suelo equilibrado, siendo ligero, aireado y permeable. Un suelo con textura predominante en cualquiera de las fracciones (suelo arenoso, arcilloso o limoso) siempre será deficiente por alguna causa, por ejemplo, el suelo arenoso no tiene capacidad de retener agua y el suelo arcilloso no tiene aireación y se encharca con facilidad al ser impermeable. Los materiales de tamaño superior a 2mm son las gravas (gravillas, cantos, guijarros...) detienen la ascensión capilar del agua, impidiendo la excesiva evaporación, también disminuyen la cohesión del suelo, por lo que tendrá mejor aireación y drenaje y será más fácil de trabajar. (26)

Figura 1: Clases texturales



Fuente: USDA 2000

- **Estructura del suelo**

Es la manera como se unen partículas para formar terrones, cuando las partículas están unidas en formas de láminas o lajas se dice que hay

estructura laminar, cuando forman columnas con los bordes redondeados se dice que la estructura es de columna y si estas tienen bordes angulosos, la estructura es prismática. Si las partículas del suelo se unen en forma de bloque de varios tamaños con bordes redondeados o angulosos, se dice que la estructura es blocosa.

Cuando las partículas de suelo forman terrones pequeños y redondeados como gránulos, la estructura se dice que es granular. Se dice que no hay estructura cuando las partículas del suelo no forman terrones. Esto ocurre en aquellos suelos gredosos, en donde se forma una masa que no rompe en terrones y en los suelos arenosos, donde las arenas no están reunidas en granos pequeños. (26)

- **Porosidad del suelo**

Que está compuesta por los poros o pequeñas cavidades que existen en el suelo, por lo que en estas cavidades o poros penetran el aire y el agua. En los suelos que tienen partículas grandes como las arenas, los poros son grandes y el agua y el aire penetran fácilmente, pero también hay suelos que tienen partículas más pequeñas como las arcillas, los poros son muy pequeños por lo tanto agua y el aire no penetran con facilidad.

El movimiento del agua y del aire a través del suelo, dependen de la porosidad de los mismos, característica que está determinada en gran medida por la estructura. La estructura granular proporciona la porosidad adecuada para la buena infiltración del agua y un excelente intercambio de aire entre el suelo y la atmósfera. Esto crea un medio físico ideal para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, en los casos donde existe formación de costras en la superficie, capas de arcilla compactas u otro tipo de capas endurecidas superficiales, el crecimiento de las plantas se ve obstaculizado debido a una porosidad restringida. La aplicación de prácticas de manejo adecuadas puede mejorar la estructura del suelo y, por ende, crear mejores condiciones para la producción de cultivos. (26)

- **Permeabilidad del suelo**

Es la facilidad con que el agua y el aire se mueven dentro de él, los suelos que se encharcan tienen permeabilidad muy lenta. (26)

- **Profundidad del suelo**

Hasta donde llegan, sin tropiezo, las raíces de las plantas en busca de agua y alimentos. Los tropiezos o limitaciones que encuentran las raíces para penetrar son capas endurecidas, piedras o rocas, agua de sales dañinas. (26)

- **Drenaje del suelo**

Es la rapidez con que los suelos se secan después de un aguacero. (26)

#### 2.2.4 Tipos de suelo

Se clasifican en:

- **Suelos arenosos:** son aquellos suelos que no retienen el agua, al poseer poca materia orgánica no son aptos para la agricultura. (38)
- **Suelos calizos:** en estos suelos abundan las sales calcáreas, suelen ser de colores blancos y también áridos y secos, por lo tanto, no son buenos para la agricultura. (26)
- **Suelos fumíferos** (también llamados tierra negra): son aquellos que poseen gran cantidad de materia orgánica en descomposición, son fantásticos para retener el agua y por lo tanto son excelentes para cultivar el agua.
- **Suelos arcillosos:** estos suelos están formados por pequeños granos finos de color amarillo y retienen el agua en charcos, pero si son mezclados con humus pueden resultar muy efectivos para la agricultura. (26)
- **Suelos pedregosos:** formados por toda clase de roca y piedras, al no retener el agua resultan pésimos para cultivar.
- **Suelos mixtos:** es una mezcla de suelo arenoso y de suelo arcilloso. (26)

### **2.2.5 Metales pesados**

Los metales se definen en base a sus propiedades físicas en el estado sólido como son: alta reflectividad, alta conductividad eléctrica, alta conductividad térmica, propiedades mecánicas como fuerza y ductilidad. Otra definición más práctica, desde el punto de vista de la toxicidad, se basa en sus propiedades cuando están en solución: “metal es un elemento que bajo condiciones biológicas puede reaccionar perdiendo uno o más electrones para formar un catión”. Los metaloides poseen propiedades físicas semejantes a las de los metales y no metales, estos son el arsénico, germanio, antimonio, selenio y telurio. Los compuestos metálicos y metaloides se presentan en diferente estado de oxidación en agua, aire y suelo y presentan diversos grados de reactividad, carga iónica y solubilidad en agua. La definición rigurosa de metal pesado todavía no es establecida por los científicos y es tema de discusión y polémica. Una de sus definiciones se basa en la gravedad específica: “metal pesado es aquel metal con gravedad específica  $> 5 \text{ g/cm}^3$ ”; sin embargo, esta definición no es útil respecto al estudio de los efectos toxicológicos que algunos metales tienen sobre el ambiente y los seres vivos, así que otra definición de metal pesado que se ha adoptado es “grupo de metales o metaloides asociados con contaminación y toxicidad potencial”. (27)

### **2.2.6. Problemática de metales pesados en el ambiente**

La presencia de metales pesados en el medio ambiente es una gran amenaza para los seres humanos (28). Ya que el impulso de las actividades industriales, ha favorecido cada vez más la generación de residuos potencialmente tóxicos, que en altas concentraciones pueden tener efectos nocivos a la salud del hombre y desequilibrios ecológicos. Uno de los problemas más notables a nivel mundial, el cual ocupa un lugar sobresaliente, es la progresiva degradación de los recursos naturales, causada por la gran diversidad de contaminantes tóxicos orgánicos e inorgánicos en la atmósfera, agua, suelo y subsuelo, procedentes de diversas actividades naturales y sociales, generando un irremediable deterioro en el ambiente. (29)



Los metales se incluyen dentro de las sustancias más persistentes emitidas al ambiente, los cuales tiene efectos importantes sobre los seres vivos. La exposición ambiental a los metales generalmente resulta en un continuo de respuestas biológicas que se da en todos los niveles de organización biológica.

Estas respuestas pueden observarse desde alteraciones a nivel molecular, comprometiendo la salud del individuo, hasta poner en riesgo la salud del ecosistema. (30)

Los desechos industriales y mineros son la principal fuente de contaminación ambiental por los metales pesados, como consecuencia se ha contaminado grandes áreas de tierra y agua con metales tóxicos, causando serios problemas ambientales y de salud. La contaminación ambiental ya es un problema mundial, los metales pesados pertenecientes a los contaminantes más importantes. (31)

#### **2.2.7. 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 a otras plantas, y se manifiesta mediante una interacción entre el genotipo y su ambiente (32), lo cual determina su sobrevivencia.

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. (33)

#### **2.2.8. Absorción y transporte de metales en las plantas**

Los iones solubilizados en la zona de la raíz entran en ella gracias al movimiento del flujo del agua o por difusión entre la solución que hay dentro del apoplasto de la raíz y la circundante. La solución del suelo y los iones disueltos pueden entrar directamente por la vía simplástica (entrada dentro de las células) o apoplástica, en un flujo desde la epidermis hasta la Banda de Caspari a través del espacio libre intercelular.

La Banda de Caspari obliga a los elementos químicos a continuar el camino por la vía simplástica, es decir, a penetrar en el interior de las células vegetales. A nivel de la membrana celular la entrada de los iones (absorción) se produce de forma general mediante proteínas transportadoras. Aunque hay distintos tipos de transportadores de membrana, en el caso del arsénico hay dos que tienen un papel fundamental en su absorción: las acuaporinas y los transportadores de fosfato. Las acuaporinas son canales de entrada de agua, juegan un papel fundamental en la absorción de moléculas sin carga como glicerol, amoníaco y ácido bórico, silícico y arsenioso. (34)

Mientras, los transportadores de fosfato pueden permitir la entrada de metales en muchas especies vegetales, esta forma tiene una alta afinidad por los grupos - **SH** y suele ser complejada y almacenada en la vacuola, pero también puede transportarse. El transporte xilemático de los metales tiene gran importancia porque va a determinar la distribución y localización de los metales en la planta. El fosfato es un anión altamente móvil en planta, por lo que ayuda a los metales a estar movilizados.

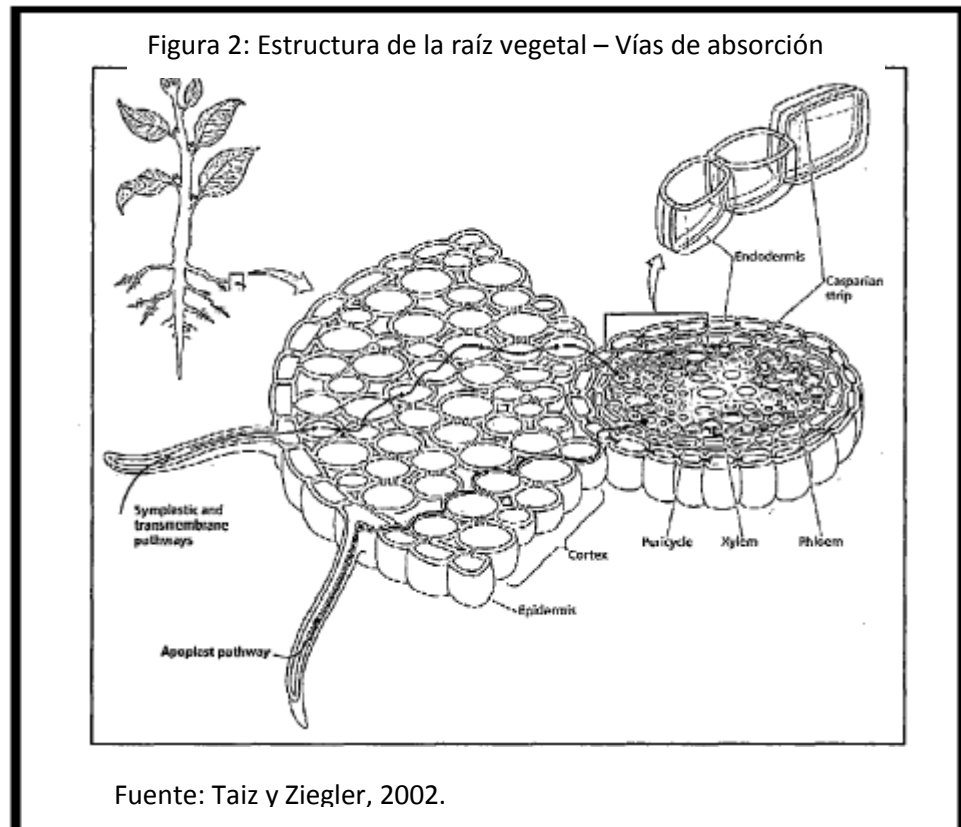
Existe una clasificación realizada en función de la concentración de elemento traza que se encuentra en la parte aérea de las plantas. (33)

- a) **Plantas exclusoras:** son aquellas que restringen la llegada del elemento en cuestión a la parte aérea, por lo que su concentración es baja. Cuando la concentración de tóxico en el medio es demasiado alta, la planta no puede excluirlo y se refleja una subida repentina de su concentración, lo que suele causar efectos drásticos sobre la planta.
- b) **Plantas indicadoras:** la concentración de elemento en parte aérea es proporcional a la que hay en el suelo.
- c) **Plantas acumuladoras:** aquellas que muestran una concentración elevada de elemento traza en la parte aérea, mayor que la del suelo en que viven. Especialmente llamativo es el caso de las especies hiperacumuladoras. Se han establecido varios criterios para definir la hiperacumulación de un

elemento, pero básicamente tienen en común la concentración inusualmente alta en parte aérea de elementos traza. (35)

Las características más comunes para declarar una planta como hiperacumuladora son:

- a) Que la concentración de elemento en parte aérea sea alta, en el caso del As  $> 0,1\%$
- b) Que la concentración en parte aérea sea 10 - 500 veces mayor que la de la misma planta en ambientes no contaminados.
- c) Que la ratio de las concentraciones del elemento en parte aérea y raíz sea  $> 1$ . Recientemente se ha lanzado la hipótesis de que la acumulación de elementos traza en parte aérea podría ser un mecanismo de defensa frente a sus enemigos, especialmente herbívoros, ya que dichas plantas serían menos atractivas para su consumidor o incluso causarían su muerte. (36)



### **2.2.9. Factores que afectan a la disponibilidad de los metales pesados en las plantas**

Estos factores están relacionados con la meteorización química de la roca madre (37). La solubilidad de los elementos pesados puede estar afectada por las características presentadas por estos y las condiciones medio ambientales.

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

El pH del suelo es el factor principal que condiciona los procesos de adsorción en el suelo y la actividad de los metales, por lo que afecta la adsorción de cadmio, cobre y plomo (38). Este efecto ha sido explicado por diversos mecanismos como precipitación, la hidrólisis metálica, adsorción de metales, la competencia de los cationes metálicos por los sitios de intercambio (39), la ionización de grupos superficiales, el desplazamiento del equilibrio en las reacciones de complejación superficiales, la competencia con  $H_3O^+$  y  $Al^{3+}$  por los sitios negativos y los cambios en la especiación metálica (40). Además, generalmente, los metales quedan retenidos en el suelo a pH básicos, mientras que a pH ácidos los metales están más solubles siendo, por lo tanto, mayor su disponibilidad para las plantas (37), excepto algunos metales, como el arsénico, selenio y cromo hexavalente, más biodisponibles a pH básicos. (41)

#### **b) Intercambio catiónico**

Los suelos se caracterizan por presentar un sistema coloidal a través del cual puede retener cationes en su superficie (42). De acuerdo con el principio de electro-neutralidad, las cargas negativas en la superficie de los coloides son neutralizadas por una cantidad equivalente de cationes en la solución suelo, los que pueden quedar adsorbidos o retenidos (43).

Esta adsorción de cationes por el suelo es denominada “adsorción no específica”, que se caracteriza cuando el ion es atraído electrostáticamente por las superficies cargadas de la fracción coloidal del suelo, sin que haya una dependencia de configuración electrónica con el grupo funcional de la

superficie del suelo, formando complejos llamados de esfera externa (44). La cantidad de iones que pueden ser adsorbidos de forma intercambiable en el suelo se llama capacidad de intercambio catiónico. En la mayoría de los casos existe selectividad o preferencia de un catión por otro, por lo tanto, es un proceso competitivo y reversible (44). En general, la adsorción de los metales a las partículas del suelo reduce la concentración de los metales en la solución del suelo. Así, un suelo con una capacidad de intercambio catiónico alta, tiene más sitios de intercambio en la fracción coloidal del suelo, los que estarán disponibles para una mayor adsorción y posible inmovilización de los metales. (45)

### **c) Adsorción específica**

La adsorción específica se produce por la afinidad de algunos cationes metálicos por un sitio particular de adsorción, por esta razón los metales son adsorbidos específicamente en cierto orden de preferencia, por ejemplo,  $Cd < Zn < Cu < Pb$ ; por lo tanto, los metales no siempre están afectados por la competencia de otros cationes (38). Se caracteriza por ser fácilmente reversible.

Es un fenómeno de alta afinidad, involucrando mecanismos de intercambio entre el metal y el ligando de la superficie de los coloides por medio de enlaces covalentes o iónicos. Este término ha sido utilizado para explicar la razón por la cual algunos suelos adsorben determinados cationes en concentraciones superiores a su capacidad de intercambio catiónico (38). Los metales pesados que se encuentran como aniones: arsénico (As), selenio (Se), molibdeno (Mo), también pueden presentar adsorción específica en las superficies de los óxidos e hidróxidos hidratados. La adsorción específica es altamente dependiente del pH e involucra a los coloides orgánicos e inorgánicos (materia orgánica y óxidos hidratados de Al, Fe y Mn), y ocurre cuando la concentración de los metales es baja. Como consecuencia de la adsorción específica, los metales son removidos de la solución suelo y retenidos en la superficie de los coloides formando moléculas estables, llamadas complejos de esfera interna. Este mecanismo muchas veces no es reversible. (45)

#### **d) Precipitación**

Las reacciones de precipitación y disolución dependen del producto de solubilidad ( $K_{ps}$ ) del sólido en agua. Los iones metálicos en la solución suelo pueden precipitar con un agente químico, generalmente aniones como fosfato, carbonato o sulfato (46). También pueden precipitar como hidróxidos al reaccionar con los iones oxidrilos presentes en la solución (39). La precipitación/disolución son procesos que además se ven influenciados por el pH y el potencial redox del suelo.

Las reacciones de precipitación están asociadas normalmente a suelos alcalinos y calcáreos con concentraciones relativamente altas de metales pesados, y además a condiciones que favorezcan una baja solubilidad de estos metales o a la presencia de pocos sitios de adsorción específica (43). La precipitación es improbable que suceda en condiciones ácidas, excepto cuando hay grandes cantidades de cationes y aniones. La precipitación de Cd es poco probable que ocurra en suelos neutros y ácidos, excepto cuando hay altas concentraciones de carbonatos, sulfatos o fosfatos. (47)

#### **e) Complejación y quelación**

La complejación de metales involucra a un ion metálico en solución que está siendo rodeado por uno o más ligandos orgánicos o inorgánicos (46). La quelación ocurre cuando un ligando polidentado, generalmente una molécula orgánica grande, ocupa dos o más sitios de coordinación alrededor de un ion metálico central (25). Dentro de los ligandos complejantes orgánicos se encuentran los ácidos cítrico, oxálico y gálico, además de ácidos complejantes más estructurados, como aquellos incluidos en las fracciones húmica y fúlvica solubles (42). Los hidróxidos y el ion cloruro son considerados como los ligandos inorgánicos más importantes. (44)

## 2.2.10. El cadmio en el suelo

### a) Significado ambiental del cadmio en el suelo

El cadmio (Cd) es un metal no esencial que está naturalmente presente en todos los suelos. El cadmio se presenta en el suelo como catión divalente ( $\text{Cd}^{+2}$ ) en concentraciones que van de 0.1 – 1.0 mg/kg. Las concentraciones comunes de Cd en los suelos son algunas veces mayores que los valores originales (geogénicos) debido a los agregados históricos a través de las deposiciones atmosféricas y el uso de fertilizantes fosfatados. La concentración de Cd en el suelo representa solo una mínima fracción ( $10^{-4}$  –  $10^{-6}$ ) del total de cationes intercambiables o de los cationes en la solución suelo. Por lo tanto, la presencia de Cd es improbable que afecte la química del suelo. Contrariamente, el Cd puede afectar la función del ecosistema en niveles traza debido a su pronunciada toxicidad. Adicionalmente, la toxicidad de Cd en el suelo es persistente, no solo porque su tiempo de residencia excede décadas sino también porque su biodisponibilidad no disminuye en el largo plazo. (48)

El riesgo de Cd en el suelo a los humanos se presenta en concentraciones de Cd en el suelo bien bajas comparadas con aquellas necesarias para causar efectos visuales y directos sobre las plantas o biota del suelo. Los efectos sobre la salud humana están relacionados a la exposición vía los canales alimenticios, es decir, el consumo de cultivos contaminados con Cd. La ingesta dietética de Cd constituye generalmente más del 90% de la exposición humana al Cd en la población general y la mayor parte del Cd dietético es derivado del suelo vía absorción en los principales cultivos alimenticios, por ejemplo, cereales y papa. La exposición crónica (de por vida) es mucho más importante que los eventos individuales de alta ingesta debido a que el Cd en un periodo promedio de vida biológico es de 15 a 20 años en humanos y el efecto se manifiesta en personas adultas (> 50 años). Esto significa que un consumo poco frecuente de un alimento conteniendo alto Cd que crece en un suelo contaminado por Cd tiene

menos efecto que el consumo de por vida de alimentos moderadamente contaminados. Por estas razones, el riesgo de contaminaciones de Cd en los suelos puede ser bajo si hay suficiente “dilución” con productos alimenticios que crecen en otra parte. El Cd del suelo es un riesgo si las personas usan el mismo suelo para cultivar sus principales productos alimenticios por un apreciable tiempo de su vida. (48)

#### **2.2.11. Emisiones de cadmio al suelo**

El cadmio es enriquecido por las actividades humanas vía deposición atmosférica y a través de aplicaciones de fertilizantes fosfatados y lodos de depuradora. El cadmio de las minas, producción, uso y disposición son una fuente neta de Cd que puede finalizar en el suelo. Más del 80% del consumo de Cd común es usado para la producción de baterías recargables (49). Otros usos tales como estabilizadores de PVC, pigmentos y enchapados han disminuido drásticamente como resultado de regulaciones ambientales. La Oficina Mundial de Estadística de Metales (49), estimó que el consumo anual mundial de Cd fue casi 18 000 toneladas en el 2008, que fue 10-20% más bajo que en 1991. El consumo de Cd aumentó en China mientras que disminuyó en los países occidentales. El uso reducido de Cd y el cambio en uso de baterías que son mayormente recicladas han disminuido generalmente las emisiones de Cd al agua y a los lodos de depuradora en el mundo occidental. (50)

La contribución de los fertilizantes fosfatados al Cd en el suelo ha conducido lógicamente a proyectos para limitar el Cd en fertilizantes fosfatados. Un modelo de balance de masas ha sido usado para estimar concentraciones de Cd permisibles en los fertilizantes, es decir, concentraciones en las cuales estén balanceadas las pérdidas anuales a las entradas, y las concentraciones de Cd en el suelo no se incrementen posteriormente. Una evaluación utilizando el modelo de balance de masas, mostró que en 100 años de uso continuo de fertilizantes fosfatados con una relación promedio de alrededor de 140 mg Cd/kg P (60 mg Cd/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)



podría incrementar el Cd en el suelo en 20%. Esto podría incrementar el Cd en los canales alimenticios en casi el mismo factor si es que no se observa una fijación pronunciada de Cd. (51)

#### **2.2.12. Reacciones del cadmio en los suelos**

El cadmio en los suelos está casi invariablemente presente en el suelo en el estado de oxidación Cd(II). No es un metal de transición. Participa en enlaces covalentes con superficies adsorbentes y, es por lo tanto, menos soluble que cationes como el  $\text{Ca}^{+2}$ . (48)

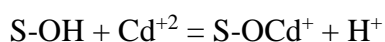
El cadmio es un contaminante ambiental que puede ser fácilmente absorbido por las plantas y puede entrar a los canales alimenticios, causando riesgo a la salud humana. También puede afectar la calidad del suelo y, si el fácilmente lixiviado tiene el potencial para contaminar aguas y tierras superficiales. La adsorción y desorción son procesos críticos que controlan la fitodisponibilidad y movilidad del cadmio en los suelos. Los autores proponen el análisis de los mecanismos de histéresis de la adsorción y desorción del cadmio en los suelos y factores tales como el pH, la fuerza iónica, el índice de cationes, la presencia de otros cationes metálicos pesados, aniones inorgánicos, ligantes orgánicos, tasa de carga de cadmio, y el tipo y cantidad de materia orgánica y coloides inorgánicos que influyen en estos procesos. (52)

Las concentraciones de Cd en soluciones de suelo no contaminados (Cd total  $\sim 0.2$  mg Cd/kg) en el rango de pH neutro es  $< 0.1 - 5 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Esto significa que solo una pequeña fracción del Cd total está presente en la solución suelo y la pérdida anual de Cd por lixiviación son generalmente imperceptibles. El mecanismo de enlace preciso de Cd en el suelo es casi imposible detectar con técnicas espectroscópicas comunes en concentraciones ambientalmente relevantes. Por lo tanto, los datos de solubilidad o extracción química son usados para inferir indirectamente el mecanismo de enlace de cadmio (53) . Se sugirió que la adsorción y no la precipitación controlan el Cd en solución en concentraciones

ambientalmente relevantes en el suelo (0.1 – 10 mg/kg); el Cd en solución incrementa casi proporcionalmente a la adición de Cd, mientras que las reacciones de precipitación podrían inferir las constantes de concentración en solución con el incremento de adiciones de Cd. La precipitación es improbable que controle la solubilidad del Cd a menos que sea excesiva la contaminación de Cd y el pH sea mayor de 7.0. Por ejemplo, el producto de solubilidad del  $\text{CdCO}_3$  ( $K_{ps} = 10^{-12}$ ), la forma de Cd posiblemente más insoluble en suelos aeróbicos, predice que el Cd precipita en suelos calcáreos a pH 8.5 solo sobre  $55 \mu\text{g Cd}^{+2} \cdot \text{L}^{-1}$ .

Las reacciones de adsorción y complejación en solución en un suelo reducen típicamente el  $\text{Cd}^{+2}$  a ese pH a  $< 10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  para los suelos que tengan 10 mg Cd/kg. Esto significa que las concentraciones de Cd en el suelo deberían exceder  $> 100 \text{ mg Cd/kg}$  para que esta reacción de precipitación pueda presentar valores muy superiores al rango de concentraciones de Cd en el suelo. (48)

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



En donde, S-OH es el grupo hidroxil superficial. Esta ecuación simplificada predice que el incremento de  $\text{H}^+$  disminuye drásticamente la adsorción. Las constantes de adsorción de  $\text{Cd}^{+2}$  para ácidos húmicos (la fase adsortiva principal de la materia orgánica del suelo) y de los hidróxidos de Fe ilustran que las órdenes de magnitud del  $\text{Cd}^{+2}$  son más selectivas que el  $\text{Ca}^{+2}$ . La selectividad  $\text{Cd}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$  para la adsorción en minerales de arcilla es típicamente menos de 5 en condiciones normales, por lo tanto, es poco probable que los minerales de arcilla sean importantes adsorbentes para el

Cd en la mayoría de los suelos. Los modelos de especiación predicen que la mayor parte del Cd está enlazado a la materia orgánica en los suelos con pH < 6.5 mientras que los óxidos de Fe son los más importantes constituyentes adsorbentes a pH > 6.5 (54).

### **2.2.13. Transferencia del cadmio en el sistema suelo – planta**

El cadmio no tiene un rol fisiológico conocido en las plantas superiores, pero es fácilmente absorbido del suelo y es translocado a los tejidos aéreos de la planta (55). Se reportan tres principales caracteres de absorción de Cd:

#### **a) Biodisponibilidad relativamente alta**

Las concentraciones de Cd en el cultivo son mayores que las concentraciones de Cd en el suelo.

#### **b) Absorción no regulada**

La absorción de Cd no está regulada por límites fisiológicos (demanda de la planta) y la absorción de Cd no incrementa con el incremento de concentraciones de Cd en el suelo. Estudios experimentales reportan que el Cd administrado como sales de Cd<sup>+2</sup>, mostraron que la absorción incrementó linealmente con el Cd en el suelo con tal que las otras propiedades del suelo permanecieran constantes. (56)

#### **c) La biodisponibilidad de Cd varía bastante y las concentraciones de Cd total en el suelo predicen pobremente la absorción de Cd**

En condiciones de idéntico Cd total en el suelo, el Cd en el cultivo varía en más de 10 veces. El Cd total en el suelo explica menos del 50% de la varianza de las concentraciones de Cd en el cultivo (25). Esto significa que las concentraciones totales de Cd en el suelo son pobres predictores del riesgo de Cd.

Los datos de concentraciones de cadmio en los cultivos y los suelos asociados generalmente muestran que las concentraciones de cadmio en el cultivo se incrementan con la concentración total de cadmio y con la

disminución del pH y, en algunos casos, con la disminución del porcentaje de materia orgánica con cadmio total constante. (57)

Los estudios de la química del suelo y fisiología de la planta han revelado los principales mecanismos que explican la variable biodisponibilidad de cadmio entre los suelos (58). Estudios de absorción de iones de corto tiempo con raíces demostraron que el cadmio es activamente absorbido y sigue un patrón dependiente de la concentración similar a la cinética de una enzima. Desde que la mayoría de las concentraciones de cadmio están debajo de la llamada constante de Michaelis, la absorción se incrementa casi proporcionalmente con el incremento de las concentraciones en solución. Similarmente, las concentraciones de los tejidos de las plantas se incrementan conforme las concentraciones en el suelo se incrementan. Este patrón está basado en el uso del concepto de Factor de Bioconcentración (FBC), también denominado concepto de Factor de Transferencia (FT) en evaluación de riesgo; es decir, una relación constante de concentración en el tejido: concentración en el suelo. En el ambiente, el FBC o FT varía debido a la diferente biodisponibilidad de cadmio. La biodisponibilidad de cadmio está relacionada a diferencias en la especiación del metal o metaloide, efectos interiónicos sobre la absorción de iones del agua en los poros y de los efectos indirectos de las propiedades del suelo sobre la translocación dentro de la planta.(48)

#### **2.2.14. Efectos del cadmio en la salud humana**

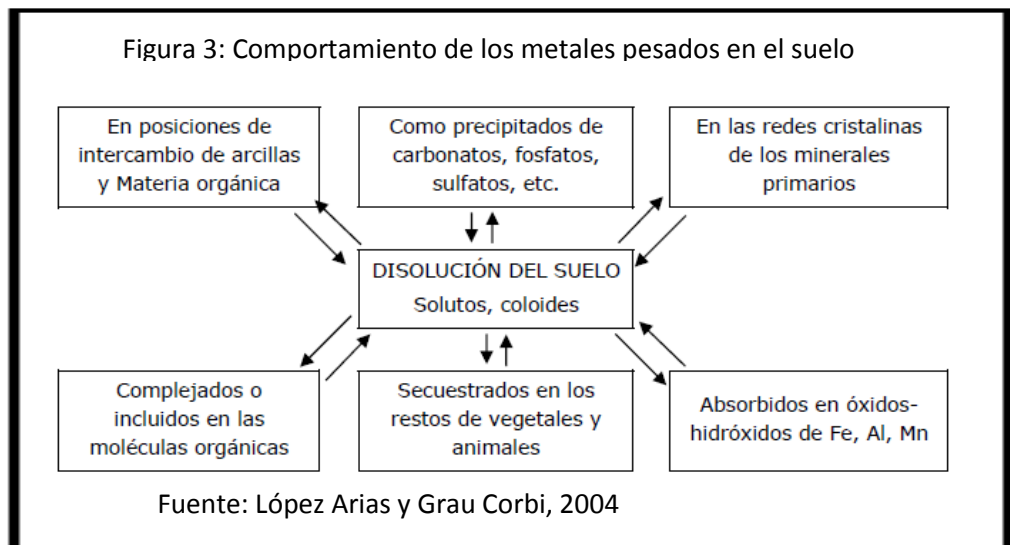
El cadmio es uno de los metales más solubles del suelo y peligrosos, debido a su alta movilidad. Es soluble en estados oxidados y tiene propiedades parecidas a las del zinc, con el cual se encuentra asociado en diversos minerales.

Las fuentes de contaminación con cadmio son: extracción minera de cadmio y zinc, procesamiento de metales, aplicación de fertilizantes fosforados. Estas fuentes liberan cadmio que es asimilado por las plantas y animales y así entra en los alimentos.

El cadmio tiene una vida media, de unos 15 años. La mayor parte se deposita en el hígado y en los riñones, y se elimina esencialmente por la vía renal. La ingesta oral ocasiona náuseas, vómitos, diarreas y dolores abdominales. La absorción por vía respiratoria puede producir desde un cuadro de hipertermia, ("fiebre de los metales") hasta una neumonitis química y un edema agudo de pulmón, que incluso puede ser mortal. Las concentraciones máximas permisibles de cadmio son de 5 ug/L en la sangre y de 5 ug/g de creatinina en orina.

#### **2.2.15. Riesgo ambiental – movilidad y biodisponibilidad de metales**

Las formas químicas en las que se encuentran los metales en el suelo y en gran medida la movilidad y biodisponibilidad que presentan viene determinada por el conjunto de los diferentes componentes del suelo, así como los factores químicos, físicos y biológicos que influyen en la reactividad de esos componentes (59). El elemento traza de un suelo se reparte entre una fracción soluble en agua, en posiciones intercambiables de arcillas y materia orgánica, unidos a óxidos, carbonatos, sulfatos y fosfatos complejados en materia orgánica y dentro de las redes cristalinas de la fracción residual. (60) (Figura 3). El equilibrio de los metales entre los diferentes componentes del suelo viene regulado por una serie de procesos bióticos y abióticos que gobiernan su comportamiento y determinan su permanencia en un compartimento u otro, es decir, su especiación biogeoquímica. Ello provoca una dinámica e intercambio de elementos entre las diferentes fases que mantiene un sistema de cuasiequilibrio bajo condiciones de campo. (60)



Los procesos que gobiernan la compartimentalización de metales en los suelos se traducen en reacciones de adsorción-desorción y precipitación-disolución, que afectan directamente al reparto de metales entre la fase sólida y acuosa, así como reacciones de complejación y oxidación-reducción que afectan a la reactividad del propio metal (solubilidad y biodisponibilidad) (61). Estas reacciones están controladas por factores ambientales como el pH, la capacidad de intercambio de cationes (CIC), el potencial redox y el propio tipo y especiación química de los elementos (21). El pH se considera el factor dominante en el comportamiento de metales, ya que afecta a la carga de superficie de las arcillas, la materia orgánica y los óxidos de Fe y Al e influye en la complejación de los metales con la materia orgánica, en las reacciones de precipitación-disolución, reacciones redox y dispersión de coloides. Un incremento de pH provoca un incremento de la adsorción y retención de cationes, con un máximo en torno a la neutralidad (62). Excepciones son el Mo, V, Cr(III) y metaloides como el As y el Se, comúnmente menos móviles bajo condiciones ácidas (9). En el caso del Cd, el incremento de la solubilidad con el descenso del pH comienza a un pH de 6,5. En el Pb y Hg comienza a valores de pH 4, mientras que en otros elementos como As, Cr, Ni y Cu comienza a solubilizarse a pH entre esos dos valores extremos. (63)

La CIC de los suelos es ampliamente dependiente de las superficies de adsorción determinadas por la cantidad y tipo de arcillas, materia orgánica y óxidos de Fe, Al y Mn. En general, cuanto mayor es el contenido en arcilla, mayor es la CIC y por tanto mayor es la cantidad de metales que pueden ser retenidos sin peligro potencial, ya que se limita la solubilidad y movilidad de los metales intercambiados. Las arcillas 2:1 (montmorillonita y vermiculita), además, tienen valores mucho más altos de CIC que las 1:1 (caolinitas) (42). La capacidad de adsorción de los óxidos de Fe, Al y Mn también puede jugar un papel importante en el control de la inmovilización de metales en los suelos y sedimentos (64). En adición, algunos metales pesados, como Co, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn exhiben afinidades bastante altas con la materia orgánica, formándose complejos solubles e insolubles. La materia orgánica tiene tanto la propiedad de intercambio de cationes como la capacidad de complejación. La atracción selectiva de cationes es menos reversible que en el caso de las arcillas debido a la formación de enlaces pH-dependientes sobre las superficies de carga variable y a la complejación con los grupos funcionales existentes. Los procesos de complejación ocurren como una reacción de intercambio con las moléculas de agua coordinadas, que son intercambiadas por algunos ligandos, y que puede ser descrita mediante el principio de los ácidos y bases fuertes y débiles de Lewis (65). Los protones y todos los cationes metálicos de interés en la disolución del suelo son ácidos de Lewis (66), mientras que las bases de Lewis incluyen  $\text{H}_2\text{O}$ , oxianiones como  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{COO}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y compuestos orgánicos de N, S y P donadores de electrones. Según el principio de Lewis, las bases fuertes prefieren complejarse con ácidos fuertes, mientras que las bases débiles prefieren complejarse con ácidos débiles, bajo condiciones comparables de fuerzas ácido-base (67). Estas uniones son mucho más fuertes debido a que los iones penetran en la estructura cristalina y son unidos por enlaces covalentes vía átomos de **O** o grupos **OH**.

El contenido de humedad de los suelos es otro factor importante que gobierna la especiación de metales y su movilidad a través de reacciones de oxidación-reducción. Bajo condiciones reductoras se pueden formar

sulfuros de metales, que son bastante insolubles, por lo que la movilidad y biodisponibilidad son considerablemente menores que las esperadas bajo condiciones oxidantes. El análisis de una disolución extraída de un suelo tratado con lodo indica, por ejemplo, el descenso de la solubilidad de Cd, Cu y Zn y el incremento de la solubilidad de Mn y Fe bajo condiciones reductoras (68). Por otro lado, se sabe que la naturaleza química de las superficies minerales es el factor más significativo que contribuye a la retención/movilidad de contaminantes, y esas propiedades son generalmente consideradas invariables durante el tiempo de exposición y reacción del contaminante. Algunos estudios demuestran, sin embargo, que la superficie química mineral se modifica ampliamente por cambios en el estado de oxidación del Fe en la estructura cristalina mineral, suponiendo un gran impacto en el ambiente químico. La actividad redox de la superficie mineral afectará al estado de oxidación, y consecuentemente a la especiación y comportamiento químico, de los metales iónicos de la fase acuosa sensibles a las reacciones redox (como por ejemplo el Cr, que puede pasar de Cr<sup>6+</sup> a Cr<sup>3+</sup>, menos móvil y peligroso y que puede precipitar como óxido). Las variaciones en la oxidación-reducción deben desempeñar sobre los compuestos adsorbentes sensibles a las reacciones redox, por tanto, cambios químicos *in situ* durante cortos períodos de tiempo que produce diferencias vitales en la especiación y reactividad de todos los componentes en el sistema suelo-agua. (9)

Finalmente, ciertas propiedades físico-químicas de los propios elementos, como su electronegatividad, el potencial iónico, radio iónico y diámetro del ion hidratado en disolución acuosa, presentan igualmente influencia sobre el comportamiento biogeoquímico de los metales. La electronegatividad influye en el orden por el cual los metales pesados son adsorbidos en los constituyentes del suelo, de manera que aquellos metales más electronegativos tienden a formar fuertes uniones covalentes con átomos de oxígeno en la superficie. Para algunos metales divalentes, las preferencias de unión podrían ser: Cu>Ni>Co>Pb>Cd>Zn>Mg>Sr (9). Sin embargo, la fuerza de unión está influenciada también por el potencial iónico (relación carga/radio), generando un patrón diferente:



Ni>Mg>Cu>Co>Zn>Cd>Sr>Pb (9). Los metales traza trivalentes Fe<sup>+3</sup> y Cr<sup>+3</sup> podrían ser preferentemente adsorbidos, en cualquier caso, en presencia de los metales divalentes listados anteriormente. De la misma manera, cabe comentar que los óxidos de Mn muestran una preferencia particularmente fuerte por la adsorción de Cu, Ni, Co y Pb, mientras que los óxidos de Fe y Al adsorben preferencialmente Pb y Cu. (69)

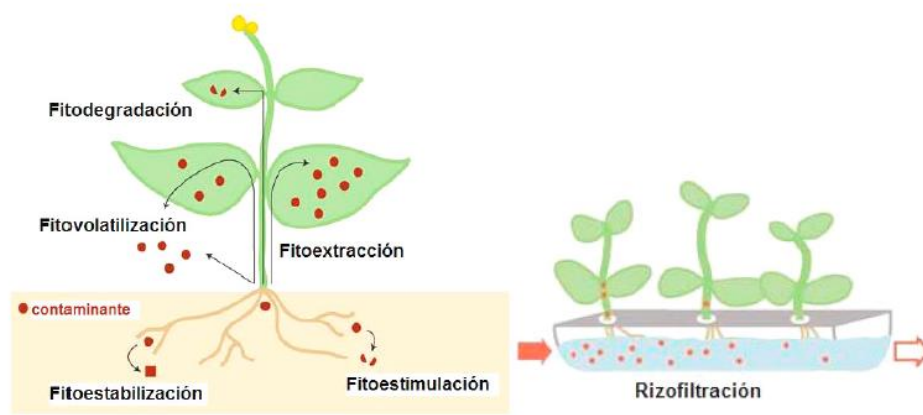
Debido a esta variedad de factores, la movilidad y el riesgo de toxicidad por metales para los diferentes organismos y para la salud humana no pueden ser únicamente basados en la concentración total del elemento en cuestión, sino más bien en su estado físico-químico (70). La biodisponibilidad de un elemento se refiere a las formas biológicamente disponibles que pueden llegar a ser absorbidas por un organismo e integrarse en su metabolismo (71), y va a depender fundamentalmente de las formas o especiación en las que se encuentren los metales en el suelo y de la capacidad de absorción del propio organismo. De hecho, la absorción y toxicidad de muchos metales muestran una marcada dependencia con la especiación y son frecuentemente correlacionados con la actividad del ion metálico libre. (72)

Los procesos de extracción secuencial es una herramienta frecuentemente usada para el establecimiento del fraccionamiento de metales en los suelos (73), y nos permite identificar los principales puntos de unión y asociaciones de los elementos traza en los diferentes constituyentes del suelo. Esto permite evaluar la removilización potencial de los metales y el riesgo de su liberación hacia la disolución del suelo (74). En adición, se utilizan comúnmente algunos métodos de extracción simple para el estudio de la ecotoxicidad y movilidad de metales en los suelos, es decir, para determinar la fracción de metal biodisponible. Se han utilizado una gran variedad de extractantes, desde ácidos fuertes a disoluciones de sales neutras tamponadas o no tamponadas, o agentes complejantes de metales (75). Algunos de ellos son ampliamente utilizados, como el EDTA, el DTPA, o la mezcla de acetato amónico/EDTA, que suelen provocar buenas correlaciones entre los metales extraídos y los absorbidos por las plantas, y son comparados en algunos trabajos como lo citado en (76).

### 2.2.16. La fitocorrección de los suelos contaminados

La fitocorrección engloba un grupo de técnicas emergentes basadas en el uso de especies vegetales y sus microorganismos asociados para extraer, acumular, inmovilizar o transformar los contaminantes del suelo (Figura 4).

Figura: 4 Representación esquemática de los distintos mecanismos de fitocorrección. El contaminante puede ser estabilizado o degradado en la rizosfera, secuestrado o degradado dentro de la planta o volatilizado.



Fuente: Pilon – Smits, 2005

La fitoextracción, también llamada fitoacumulación, 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 (77). 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 (78). Existen plantas que presentan una acumulación extrema de metales en sus tejidos aéreos, que se conocen como plantas hiperacumuladoras (79), y que son preferentemente utilizadas en este tipo de técnicas.

### 2.2.17. Fitoextracción de metales pesados

La fitoextracción de metales pesados es una de las técnicas más prometedoras para su comercialización, apareciendo las primeras patentes en Japón en 1980 (80) y en USA en 1994 (81). 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.

El término de “hiperacumulación” fue empleado por primera vez por Brooks y Reeves en 1977 para designar a plantas que crecían sobre suelos serpentínicos capaces de acumular más de 1000 mg/kg de Ni. Actualmente se consideran hiperacumuladoras las plantas que acumulan en su biomasa aérea más de 1000 mg/kg de Co, Cu, Ni, Pb o Se, más de 10000 mg/kg de Mn o Zn o más de 100 mg/kg de Cd (82). La gran mayoría de las especies hiperacumuladoras conocidas pertenecen a comunidades vegetales características de suelos naturalmente ricos en metales, donde están perfectamente adaptadas a las condiciones ambientales particulares de su hábitat (79). Existen varias hipótesis para explicar la alta acumulación de metales en este tipo de plantas, como la absorción inadvertida, la tolerancia a metales, resistencia a la sequía, resistencia contra herbívoros/patógenos y la interferencia con las plantas vecinas (alelopatía) (83). Esta última hipótesis parece desmentirse tras los últimos ensayos llevados a cabo sobre el hiperacumulador de Ni *Alyssum murale* por Zhang et al., (2007), mientras que la hipótesis de la resistencia contra herbívoros/patógenos cobra fuerza (83).

El uso de plantas hiperacumuladoras para la fitoextracción de metales en suelos contaminados fue propuesto en primer lugar por Chaney en 1983. Sin embargo, a pesar de la gran expectación causada, la eficacia de este tipo de plantas en fitoextracción ha sido probada en muy pocas ocasiones en condiciones de campo. Algunos trabajos han mostrado una fitoextracción efectiva en suelos contaminados en Zn y Cd por parte de los hiperacumuladores *T. caerulescens* y *A. halleri* (84).

Más recientemente, Zhao et al. (2003), demostraron que la fitoextracción de Zn y Cd por *T. caerulescens* es solo eficiente en suelos moderadamente contaminados, ya que el factor de bioconcentración de Zn ([parte aérea]: [suelo]), que es una medida de la capacidad de la planta para absorber y transportar el metal del suelo hacia las partes fácilmente cosechables, varía desde 30 en suelos moderadamente contaminados, hasta 1 cuando la planta crece en suelos con una alta contaminación de Zn. Por su parte, un grupo de científicos de las Universidades de Maryland (USA) y Sheffield (UK), dirigidos por Chaney, han desarrollado diferentes estudios para determinar los requisitos de una fitoextracción comercial de Ni con especies del género *Alyssum*, consiguiendo desarrollar una tecnología patentada (85), y una fitoextracción de Zn y Cd con cultivares mejorados de *T. caerulescens*. (60)

#### **2.2.18. Fitoestabilización de metales pesados**

La fitoextracción de metales no es la mejor opción en grandes espacios de terreno con altos niveles de contaminación, debido fundamentalmente a limitaciones técnicas y financieras, así como a la inhibición del crecimiento y descenso de la productividad de las plantas (86). La fitoestabilización de los elementos contaminantes *in situ* es a veces la mejor alternativa, y en ocasiones se puede considerar como una medida temporal hasta que pueda llevarse a cabo una limpieza del suelo (87). La fitoestabilización no consigue una extracción del metal, pero reduce su movilidad y biodisponibilidad al alterar la especiación y disminuye el impacto ambiental potencial. En adición, mejora las características químicas y biológicas de los suelos contaminados (contenido en materia orgánica, nivel de nutrientes, capacidad de intercambio de cationes, actividad biológica) que aceleran el desarrollo de un ciclo de nutrientes viable y una cubierta vegetal sostenible, lo que permite la restauración del área afectada hasta condiciones aceptables para un uso secundario del terreno. (88)

La estabilidad de los contaminantes se consigue mediante una combinación de la actividad radicular de las plantas y su microflora asociada con la adición de enmiendas al suelo, lo que promueve la formación de

complejos metálicos insolubles que reducen su movilidad y disponibilidad biológica (60). Las raíces de las plantas producen cambios en la especiación de metales al producir variaciones en el potencial redox, secreción de protones, secreción de agentes quelantes, etc. Gran parte de los iones metálicos son adsorbidos físicamente a superficies externas de las paredes celulares cargadas negativamente (89), o por enlaces químicos, mientras que otra gran parte son absorbidos y secuestrados dentro de estructuras celulares en las raíces (ej. vacuolas), lo que los convierte en formas no disponibles para la translocación a la parte aérea (90). El crecimiento de las plantas produce además una estabilización física del suelo superficial y evita su erosión (91), reduciendo la generación de polvo, la movilidad de metales y radionucleidos y las respectivas vías de exposición. Finalmente, la tasa de infiltración del agua de lluvia también se ve reducida por el incremento de la evapotranspiración inducida por las plantas, reduciendo la lixiviación potencial y la generación de posibles drenajes ácidos (60). Por su parte, determinadas enmiendas como la adición de materia orgánica al suelo, el ajuste de pH, o la adición de algunos complejantes como zeolitas, beringita, fosfatos (hidroxiapatito), carbonatos, etc., promueven la inmovilización de elementos tóxicos como As, Cd, Pb y Zn (60). El incremento de pH puede resultar efectivo en la reducción de la biodisponibilidad de metales pesados, aunque el encalado podría producir un incremento en la tasa de mineralización del N y el lixiviado de  $\text{NO}_3$  hacia las aguas (92). La adición de lodos municipales, compost y otros residuos orgánicos suele mejorar el establecimiento y crecimiento de algunas especies al reducir igualmente la toxicidad de los metales (93). También la adición de sustancias húmicas y zeolitas (94), así como material arcilloso, favorece la complejación de los metales contaminantes. Las sustancias orgánicas añadidas, no obstante, deberán ser insolubles para evitar su rápida degradación por microorganismos (95) y la formación de complejos organometálicos solubles.

### 2.2.3. Definición de términos básicos

**Biodisponibilidad:** el término biodisponibilidad establece la medida de la tasa y extensión de la absorción de una sustancia activa que alcanza el sistema circulatorio de un organismo, en resumen, la extensión de su absorción y circulación sistémica por el organismo. (96)

**Contaminación:** puede ser definida como un cambio indeseable en las características físicas, químicas y biológicas del aire, agua y suelo que afecta la vida humana, la vida de los otros organismos relacionados, útiles para la vida de plantas y animales, el progreso industrial, condiciones de vida y aspectos culturales. (96)

**Contaminante:** un contaminante es algo que interfiere adversamente a la salud, el confort, amenidades, características o ambiente de las personas. Generalmente, muchos contaminantes son introducidos al ambiente como aguas residuales, residuos, descargas accidentales o son subproductos o residuos de la producción de algo útil. También son introducidos al ambiente como compuestos usados para proteger plantas y animales. (97)

**Metales pesados:** los metales pesados son elementos que tienen una densidad mayor de 5 en su forma elemental y comprenden 38 elementos. Sin embargo, el término usualmente se refiere a 12 metales que son usados y descargados por la industria, estos son, **Cd**, Cr, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn y Zn. Los metales pesados mayormente se hallan en sitios de adsorción específica en el suelo donde ellos son retenidos muy fuertemente en los coloides orgánicos o inorgánicos. (97)

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 Método y alcance de la investigación**

##### **3.1.1 Método de investigación**

###### **3.1.1.1 Método general**

El método general de investigación es hipotético-deductivo, al plantearse aseveraciones de absorción de cadmio por *maíz* (*Zea mays*), en calidad de hipótesis, buscando refutar o falsear tales hipótesis deduciendo las conclusiones. (56)

###### **3.1.1.2 Método específico**

###### **a) Selección de localidades para la muestra**

Se localizaron suelos ácidos, neutros y alcalinos, del valle del Mantaro, (tabla 2), como antecedente en el 2007 según los reportes del proyecto Mantaro Revive, se evaluaron diferentes zonas del valle del Mantaro entre ellas: Sincos, Muquiyauyo, Sicaya, San Lorenzo y Quilcas, partiendo de la premisa que en los resultados obtenidos de ese proyecto mostraron altos índices de Cd en los suelos y posteriormente bajo el juicio de expertos se concluyó con la

selección de dichas localidades para realizar el muestreo de suelos (mapa 1).

Tabla 2 – Zonas de muestreo

Localidad	Coordenadas UTM		Altitud (msnm)
	Este	Sur	
Quilcas	0471465.00	8678370.00	3 271
Sicaya	0470759.53	8671211.50	3 215
San Lorenzo	0457611.59	8690912.64	3 324
Sincos	0458422.34	8685440.25	3 283
Muquiyauyo	0450481.00	8693252.00	3 351

Fuente: elaboración propia

## b) Método de muestreo de suelos

El muestro de suelos se llevó a cabo bajo la Guía de muestreos de suelos superficiales del Minam, detallado a continuación:

### b.1) Delimitación del área

Para realizar el muestreo de suelos se escogieron las superficies más o menos homogéneas, en cuanto al tipo de suelo, color, relieve, textura, densidad, drenaje, pedregosidad, cultivos o vegetación, apariencia física y clase de manejo recibido anteriormente, donde se ubican los detalles más importantes de la finca como son: partes altas o bajas, planas o inclinadas, coloración del suelo, si es arenoso o pesado, vegetación alta, media o baja, riesgo de inundación, áreas que no se han trabajado ni fertilizado, y áreas, tal como se puede apreciar en la imagen 2.

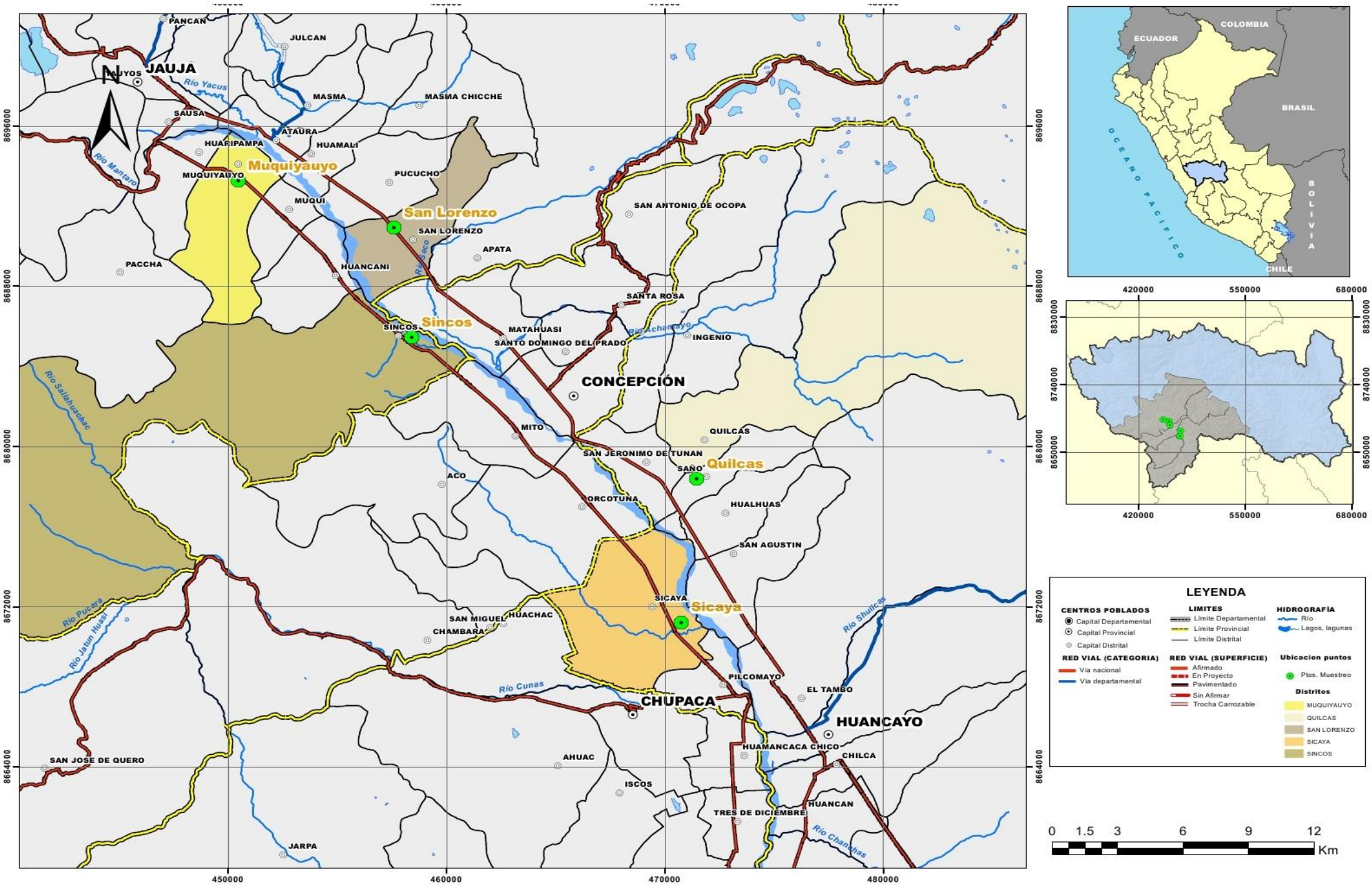


Imagen 2: Zona muestreada Sicaya



Fuente: imagen propia

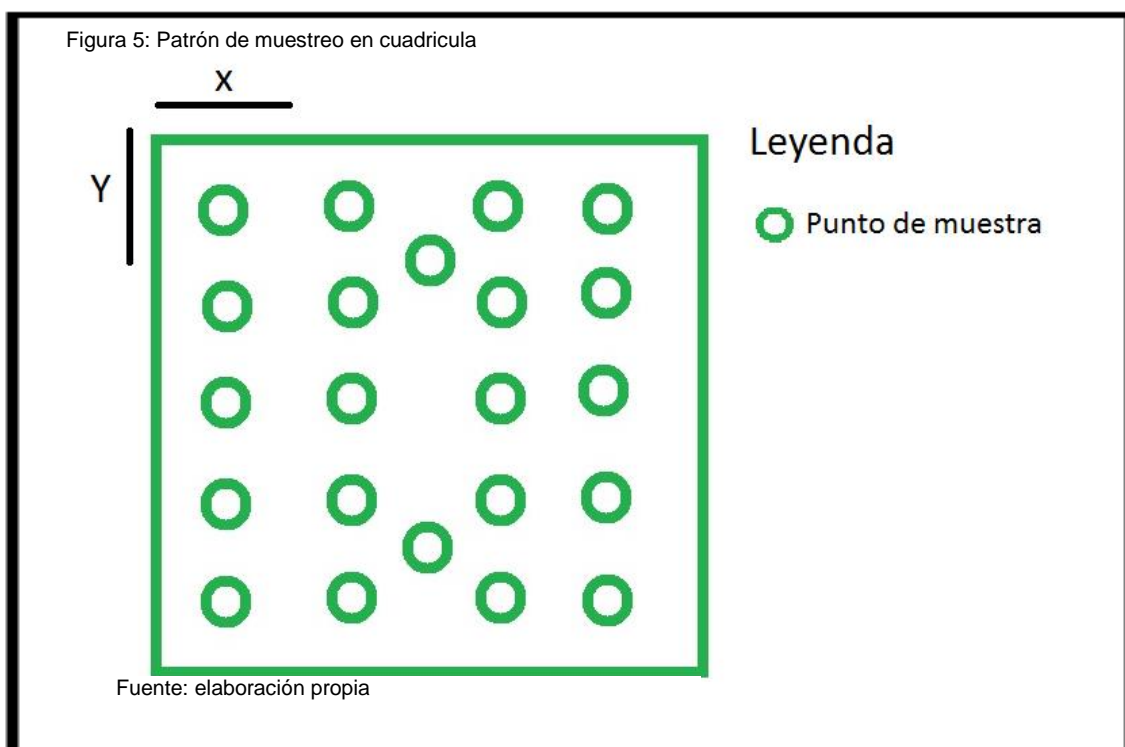
Mapa 1 – Ubicación de los puntos de muestreo Valle del Mantaro



Fuente: elaboración propia

### b.2) Patrones de muestreo para definir la localización de puntos de muestreo en suelos contaminados

Según la Guía de Muestreos de suelo del Minam, indica que según nuestro objetivo a lograr podemos seleccionar el método para realizar los puntos de muestreo convenientes, se utilizó el muestreo de rejillas regulares: en el plano se trazan rejillas con líneas paralelas y perpendiculares equidistantes, permitiendo que todas las celdas tengan las mismas dimensiones. El tamaño de las celdas depende del detalle requerido; entre más detalle se requiera, las celdas serán más pequeñas. Se marca un punto en cada celda, ya sea al centro o en las intersecciones, pero en todas las celdas los puntos deben quedar en el mismo lugar.



### b.3) Precauciones al tomar muestras para análisis de suelos

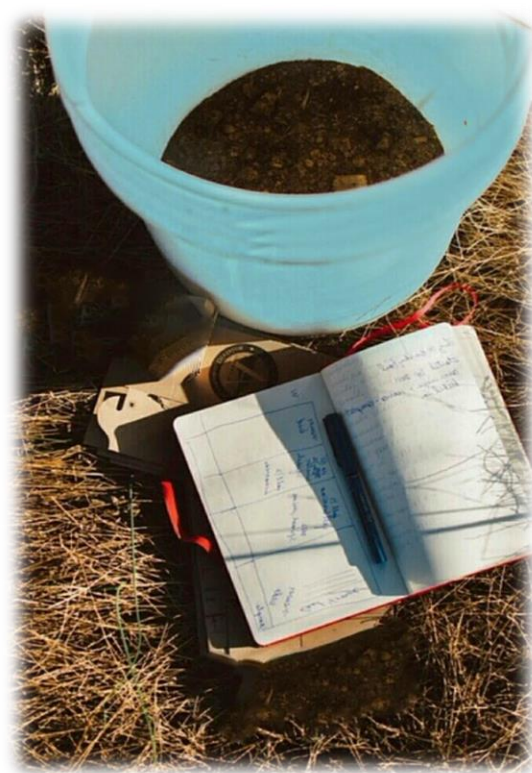
- Evitar muestrear suelos muy mojados.
- Usar bolsas plásticas nuevas y limpias, no de papel.

- No fumar durante la recolección de muestras, para evitar contaminarlas con las cenizas del cigarro, ricas en potasio.
- No tomar muestras en áreas recién fertilizadas, sitios próximos a viviendas, galpones, corrales, cercas, caminos, lugares pantanosos o erosionados, áreas quemadas, lugares donde se amontonan estiércol, fertilizantes, cal u otras sustancias que pueden contaminar la muestra.

#### **b.4) Toma de la submuestra**

Se recorrieron las parcelas al azar en forma de cuadrícula y cada 14 pasos para tomar una submuestra de suelo, limpiando antes la superficie del terreno (de todo tipo de vegetación), y depositándola en un balde. Las submuestras deben ser tomadas entre 20 y 30 cm de profundidad, luego de tener todas las submuestras en el balde (22 submuestras por ha).

Imagen 3: Toma de muestras compuestas



Fuente: imagen propia

### **b.5) Número de submuestras**

Dependerá del tamaño del área de muestreo y de la intensidad de uso. Si el terreno es uniforme se puede sacar una sola muestra de hasta 10 ha y si el terreno es de uso intenso se puede sacar entre 18 a 22 submuestras por parcela de muestreo.

### **b.6) Procedimiento de la toma de muestra**

Usando generalmente una lampa plana, se realizó un hueco en forma de “V” (imagen 4) de 20 a 30 cm de profundidad, para extraer cada submuestra, no sin antes limpiar “raspar”, la vegetación (mala hierba) que pueda existir en los puntos elegidos para la toma de la submuestra, la misma que puede alterar los resultados.

Imagen 4: Extrayendo submuestra



Fuente: imagen propia

#### **b.7) Identificación de la muestra final**

Para finalizar el muestreo según la Guía de muestreo de suelos del Minam (tabla 3) se debe rotular: el nombre del propietario de la muestra, nombre de la zona, ubicación geográfica (región o departamento, provincia, distrito y localidad), número de muestra y lote, superficie que representa y algunas informaciones complementarias como son: pendiente del terreno, riesgo de encharcamiento, tipo de vegetación, cultivo anterior, rendimiento obtenido y tipo de fertilizante usado.

Modelo de rotulado de muestra

Tabla 3: Rotulado de muestra

Nombre del punto de muestreo:				Operador: (empresa/persona):			
Coordenadas: X:		Y:		Descripción de la superficie: (p.e. asfalto, cemento, vegetación)			
Temperatura (°C):				Precipitación (sí/no, intensidad):			
Técnica de muestreo: (p.e. sondeo manual/semimecánico/mecánico, zanja, etc.)				Instrumentos usados:			
Profundidad final: (en metros bajo la superficie)				Napa freática : (sí/no, profundidad en m)			
Instalación de un pozo en el agujero: (sí/no, descripción):				Relleno del agujero después del muestreo: (sí/no, descripción):			
Clave de la muestra:							
Fecha:							
Hora:							
Profundidad desde: (en metros bajo la superficie)							
Profundidad hasta: (en metros bajo la superficie)							
Características organolépticas:							
Color:							
Olor:							

Textura:								
Compactación/Consistencia:								
Humedad:								
Componentes antropogénicos:								
Estimación de la fracción > 2 mm (%):								
Cantidad de la muestra: (volumen o peso)								
Medidas de conservación:								
Tipo de muestra: (simple/compuesta)								
<b>Para muestras superficiales compuestas:</b>								
Área de muestreo (m <sup>2</sup> ):								
Número de submuestras:								

Fuente: Guía de muestreo de suelos Minam



**c) Caracterización del tipo de suelo agrícola mediante los análisis de textura y pH**

**c.1) Procedimiento para la preparación de suelo**

Una vez recolectada la muestra en el balde.

Imagen 5: Recolección muestras compuestas



Fuente: imagen propia

- Se coloca la muestra de suelo sobre, sobre papel para evitar pérdidas.
- Se tritura con un combo de madera los terrones gruesos.

Imagen 6: Triturado de muestras grandes



Fuente: imagen propia

- Se tamiza utilizando el tamiz de 2mm para obtener Tierra Fina Seca al Aire (TFSA)

Imagen 7: Tamizado de suelo



Fuente: imagen propia

- Se embolsa debidamente la muestra de suelo tamizada para su posterior análisis.

Imagen 8: Embolsado de muestras



Fuente: imagen propia

Imagen 9: Muestras de los suelos



Fuente: imagen propia

- Etiquetado de la muestra.

Imagen 10. Etiquetado de suelos



Fuente: imagen propia

#### d) Determinación de la textura del suelo

Para determinar la textura se empleó el método de hidrómetro, se basó en las diferentes velocidades de sedimentación de las partículas primarias del suelo (arena, limo, arcilla), de acuerdo a la ley de Stoke. (67)

El procedimiento realizado se detalla a continuación:

- 1) Se pesó 50 g de TFSA (tierra fina seca al aire) y se colocó en el vaso metálico de dispersión.

Imagen 11: Pesado de muestra



Fuente: imagen propia

- 2) Se adicionó al vaso metálico de dispersión 100 ml de agua destilada, 5 ml de solución de oxalato de sodio y 5 ml de la solución de hidróxido de sodio, luego se volvió a agregar agua destilada hasta las 2/3 partes de capacidad del vaso y se agitó por 5 minutos.

Imagen 12. Preparado de muestra en vaso metálico



Fuente: imagen propia

Imagen 13. Batido de muestra



Fuente: imagen propia

- 3) Se retiró el vaso metálico de dispersión de la máquina y se transfirió el contenido a la probeta de sedimentación de Bouyoucos, lavando con agua destilada para retirar las partículas adheridas al vaso.
- 4) Se adicionó agua destilada a la probeta de sedimentación hasta 1000 ml.
- 5) Se agitó la solución de la probeta de sedimentación con la ayuda de una varilla de madera de base circular con huecos, durante 5 minutos, los movimientos deben ser de arriba **hacia** abajo para que las partículas de la muestra de suelo queden homogéneamente distribuidas en todo el volumen de la probeta.

Imagen 14: Agitado de muestra



Fuente: imagen propia

- 6) Se retiró la varilla y con el cronómetro se empezó a contar 40 segundos, mientras tanto se introdujo cuidadosamente el hidrómetro de Bouyoucos para que se estabilice y facilite la observación de la densidad. En esta etapa también se introdujo el termómetro.
- 7) A los 40 segundos, se tomó la primera lectura del hidrómetro de Bouyoucos y del termómetro, y se procedió a anotar el resultado.

Imagen 15: Toma de datos de la muestra



Fuente: imagen propia

- 8) Se retiró cuidadosamente el hidrómetro y el termómetro.
- 9) A las dos horas se realizó la segunda lectura del hidrómetro y de temperatura.

Imagen 16: Segunda toma de datos de la muestra



Fuente: imagen propia

- 10) Se realizó el cálculo de arena, limo y arcilla, utilizando la siguiente fórmula.

**Nota:** en la fórmula ya se incluyó la corrección de 0.2 por cada grado centígrado mayor o menor a 20°C

$$\text{Are. \%} = 100 - \left\{ \frac{L1. + (1^\circ \text{tem} - 20) \times 0.2}{50} \times 100 \right\}$$

$$\text{Arc. \%} = \left\{ \frac{L2. + (2^\circ \text{tem} - 20) \times 0.2}{50} \times 100 \right\}$$

$$\text{Limo \%} = 100 - (\% \text{ arcilla} + \% \text{ arena})$$

L1 = Primera lectura del hidrómetro  
L2 = Segunda lectura del hidrómetro

Tomado de SSA. Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. J.H. Dane and G. Clarke Topp, Co-editors. Soil Science Society of America Book Series. Madison, Wisconsin, USA (2002).

### e) Análisis de pH y Cd del suelo

De cada muestra compuesta se tomó una muestra de 1 kg aproximadamente para enviarla al laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria, para el análisis de cadmio; asimismo, se separó 1 kg de suelo para el análisis de pH en el laboratorio de análisis de suelos, aguas y plantas de la Universidad Nacional del Centro del Perú.

### f) Preparación de siembra

**f.1)** Se tamizó el total de la muestra de cada suelo, utilizando un tamiz de 2 mm de diámetro promedio de malla.

Imagen 17: Segunda toma de datos de la muestra



Fuente: imagen propia

**f.2)** Se pesó 2 kg de suelo y se colocó en bolsas plásticas negras.



- f.3)** Se determinó la capacidad de campo del suelo del experimento, obteniéndose 22% promedio. Se utilizó el método gravimétrico.
- f.4)** Se le agregó 440 ml de agua a cada unidad experimental para lograr el 22% de humedad a capacidad de campo.
- f.5)** Se dejó infiltrar el agua y se procedió a cerrar las bolsas hasta el día siguiente.
- f.6)** Al día siguiente, 14 de agosto de 2016, se procedió a sembrar las semillas de maíz (*Zea mays*) (*Zea mays L.*) en sus respectivas bolsas, dejando 5 semillas en cada bolsa, utilizándose un total de 75 semillas para todo el experimento, según los tratamientos en estudio.
- f.7)** A los 15 días después de la siembra se homogenizó el número de plantas por tratamiento, dejándose solo 3 plantas por cada unidad experimental (ver imágenes 18-22).

Imagen 18: Preparado de plantaciones



Fuente: imagen propia

Imagen 19: Unidades experimentales a los 15 días (Quilcas)



Fuente: imagen propia

Imagen 20: Unidades experimentales a los 15 días (San Lorenzo)



Fuente: imagen propia

Imagen 21: Unidades experimentales a los 15 días (Sicaya)



Fuente: imagen propia

Imagen 22. Unidades experimentales a los 15 días (Muquiyauyo)



Fuente: imagen propia

### g) Conducción del experimento

Se condujo el experimento en un periodo promedio de 62 días, realizándose una cuidadosa observación del crecimiento de las plantas, realizando los riegos oportunos mediante el método de pesadas, hasta observar que el volumen de suelo era limitante para el normal crecimiento de las plantas.

Finalizado el periodo experimental, el 15 de octubre de 2016, se procedió a medir la altura de planta de cada tratamiento, y posteriormente cortarla, colocándola en una bolsa de papel Kraft para llevarlo al laboratorio y secarlo en una estufa a 60°C para obtener el peso seco de la parte aérea de la planta.

Imagen 23: Unidades experimentales a los 15 días (Sincos)



Fuente: imagen propia

Imagen 24: Secado de la parte aérea de la planta.



Fuente: imagen propia

Las hojas secas de cada unidad experimental fueron enviadas al laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, para el análisis de cadmio total.

Asimismo, se procedió a sacar la raíz de las plantas, de cada unidad experimental para lavarla, orearla, y medir su longitud, se secó la muestra en una estufa a 60°C y después se registraron los datos de materia seca.

Imágen 25: Medición de raíz



Fuente: imagen propia

Finalmente se tomó una muestra del suelo de cada unidad experimental y se envió al laboratorio para el análisis de cadmio total.

Imágen 26. Muestra del suelo de cada unidad experimental para el envío al laboratorio para el análisis de cadmio total.



Fuente: imagen propia

#### h) Evaluaciones realizadas

##### Planta:

- Materia seca de la parte aérea y radicular (g)
- Contenido total de Cd (mg/kg) en las hojas
- Longitud de raíz (g)
- Altura de planta (cm)
- Tasa de transferencia del suelo a las hojas (%)

$$TTA = \frac{(Cd \text{ en las hojas})}{(Cd \text{ en el suelo})} \times 100$$

##### Suelo:

- Contenido de Cd total (mg/kg)

Tabla 4. Método de análisis de metales en suelo\*\*\*

Parámetro	Método	Unidad de expresión
Cadmio total	EPA 3050-B/EPA3051	mg.kg <sup>-1</sup> MS**

- \*EPA = Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos).
- \*\*MS = Materia seca a 105°C
- \*\*\*Fuente: D.S. 002-2013-MINAM, ECA para suelo, Perú. 2013.

## I) Técnicas de análisis de datos

Al finalizar el experimento se sistematizaron los resultados obtenidos y se analizaron los datos a través del Análisis de Variancia y se aplicó la prueba de significación de Duncan ( $p=0,05$ ) para comparar los tratamientos entre medias.

Se hicieron los análisis de regresión y correlación entre la concentración de cadmio en las hojas de *maíz* (*Zea mays*) y el contenido de cadmio total en el suelo.

### 3.2 Diseño de la investigación

#### 3.2.1 Diseño preexperimental

El diseño preexperimental utilizado fue completamente al azar, con 5 tratamientos, cada uno con tres repeticiones, totalizando 15 unidades experimentales.

Gráfico 1: Cinco tratamientos con tres repeticiones



Fuente: elaboración propia

Modelo aditivo lineal del diseño experimental completamente al azar:

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

Donde:

$\gamma_{ik}$  = Cualquier observación del experimento

$\mu$  = Media poblacional

$\tau_i$  = Efecto del i-ésimo tratamiento

$\varepsilon_{ij}$  = Error experimental

Los tratamientos en estudio se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Tratamientos en estudio.

N°	TRATAMIENTO
1	Suelo 1: pH moderadamente ácido (5.6 - 6.0) Quilcas
2	Suelo 2. pH ligeramente ácido (6,1-6,5) Sicaya
3	Suelo 3: pH neutro (6,6-7,3) San Lorenzo
4	Suelo 4. pH ligeramente alcalino (7,4-7,8) Sincos
5	Suelo 5: pH moderadamente alcalino (7,9-8,4) Muquiyauyo

Fuente: elaboración propia

### 3.1.2 Alcance de la investigación

El tipo de investigación es *aplicada*, pues es de naturaleza eminentemente práctica para aplicar las bases teóricas del comportamiento del cadmio en el suelo, a través de la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*) y relacionarlo con su concentración en el suelo.

El nivel de investigación es *descriptivo*, se recogió información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o de las variables a las que se refieren, es un estudio efectuado en una situación “realista” en la que el investigador manipuló una o más variables en condiciones tan cuidadosamente controladas como lo permitió la situación (69); en este caso

habiendo utilizado un cobertor rústico para observar el desarrollo del cultivo de *maíz* (*Zea mays*) en cinco suelos de diferente pH.

### **3.3 Población y muestra**

#### **3.3.1 Población**

La población está constituida por los suelos agrícolas del valle del Mantaro, que tienen diferente valor de pH.

#### **3.3.2 Muestra**

La muestra está constituida por cinco suelos del valle del Mantaro: Quilcas (moderadamente ácido), Sicaya (ligeramente ácido), San Lorenzo (neutro), Sincos (ligeramente alcalino) y Muquiyauyo (moderadamente alcalino).



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información

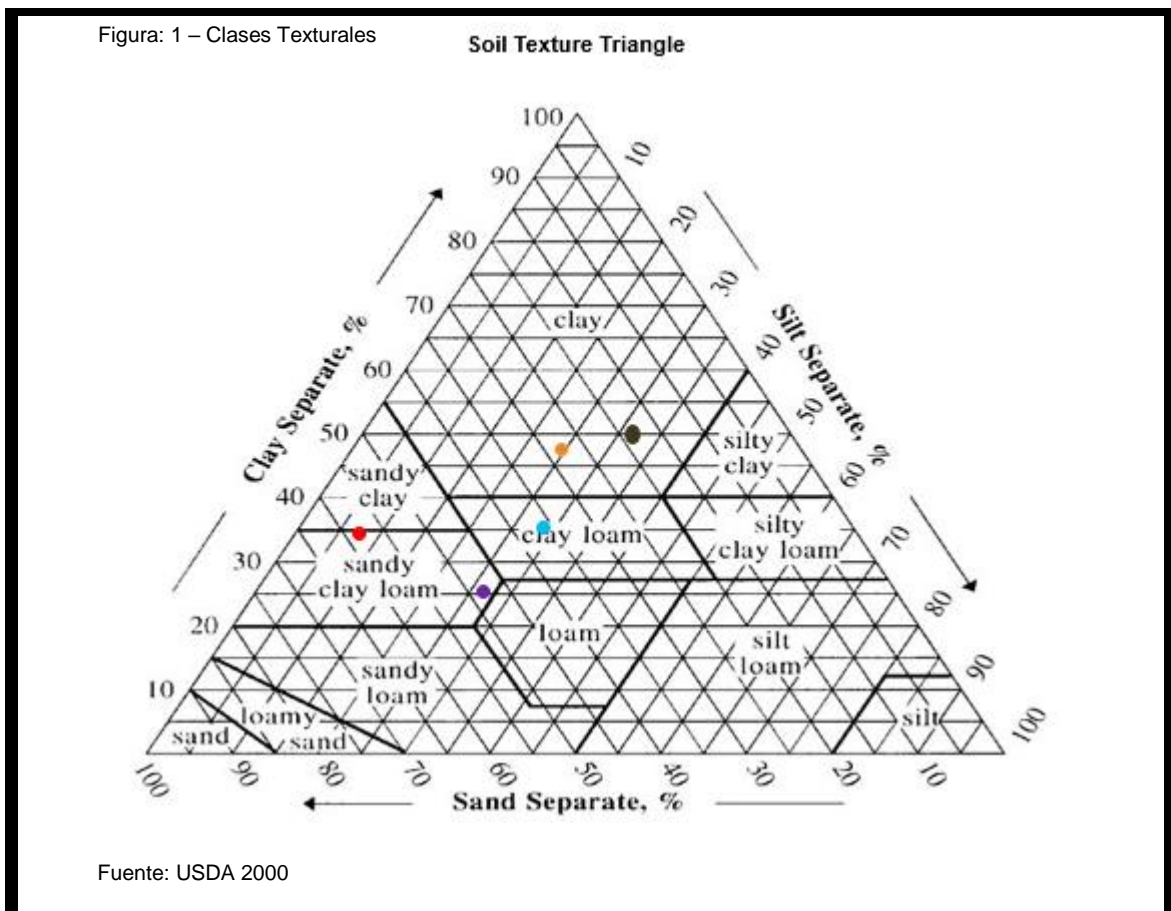
##### 4.1.1 Resultado textural

**Tabla 6. Resultados de análisis de suelo.**

	Arena	Limo	Arcilla	Textura
Sicaya	58.00%	8.00%	34.00%	Franco arcillo arenoso
Muquiyauyo	28.00%	25.00%	47.00%	Arcilla
San Lorenzo	36.00%	29.00%	35.00%	Franco arcilloso
Quilcas	48.00%	27.00%	25.00%	Franco arcillo arenoso
Sincos	19.00%	31.00%	50.00%	Arcilla

Fuente: elaboración propia

Los resultados texturales de los suelos muestreados presentan que la muestra de Sicaya trasciende el resultado de franco arcilloso arenoso, el suelo de Muquiyauyo es arcilloso, el suelo de San Lorenzo resultó como franco arcilloso, el suelo de Quilcas es franco arcilloso arenoso y por último la muestra de Sincos resultó como arcilloso.



#### 4.1.2 Análisis de suelos

**Tabla 7. Resultados de análisis de suelo.**

Parámetro	Contenido				
	Sicaya	Muquiyauyo	Quilcas	San Lorenzo	Sincos
pH*	6.344	8.214	5.721	6.832	7.654
Cd (mg/kg)**	1.61	6.88	1.45	1.22	7.96

Fuente:

\*Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Plantas, UNCP.

\*\*Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes, UNALM.

La calificación de los análisis del suelo, presentan a la muestra de Sicaya, como ligeramente ácido; el suelo de Muquiyauyo es moderadamente alcalino; el suelo de Quilcas es moderadamente ácido; el suelo de San Lorenzo es neutro; y el de Sincos es ligeramente alcalino. La calificación se realizó en base a la tabla de calificación de análisis de suelos. (98)

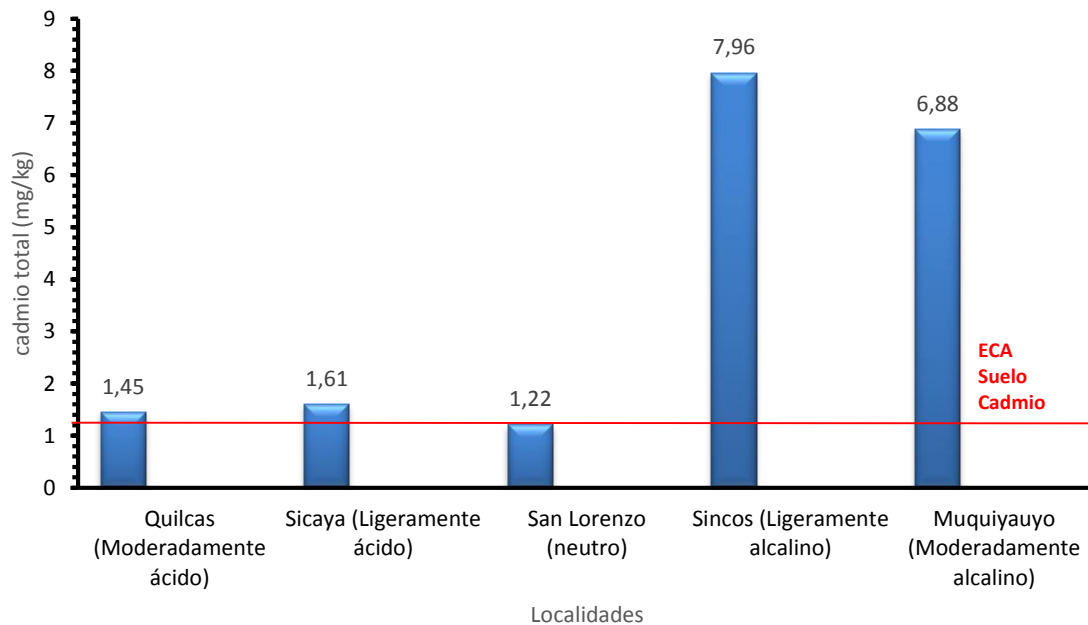
Estos datos de pH permiten ordenarlos, de mayor acidez a menor acidez, de la siguiente manera:

Quilcas > Sicaya > San Lorenzo > Sincos > Muquiyauyo

Esta propiedad química está generalmente influenciada por el material parental del suelo, pues los suelos de Sincos y Muquiyauyo tienen naturaleza calcárea que originan pH altos, por la generación de hidroxilos; en cambio los suelos de Quilcas son generalmente ácidos por las rocas ácidas en su material parental, al igual que los suelos de Sicaya y San Lorenzo.

El pH de cada suelo influirá en la probable precipitación química del elemento cadmio, pero esto ocurre en pH superiores a 8.5 y en cantidades sobre  $55 \mu\text{g Cd}^{+2} \cdot \text{L}^{-1}$  (21); estos valores altos de pH no se han encontrado en los suelos evaluados, como se observa en la tabla 7.

Gráfico 2. Contenido de cadmio total en suelos de diferente pH del valle del Mantaro



Fuente: elaboración propia

El contenido de cadmio en cada suelo evaluado supera el Límite Máximo Permisible (LMP) del ECA (Estándar de Calidad Ambiental) de suelos del Perú, cuyo valor es 1.2 mg Cd/kg, considerando a estos suelos como contaminados. Los suelos de Sincos y de Muquiyauyo superan en 6.6

veces y 5.7 veces respectivamente el ECA de suelos. Estos datos se presentan en la tabla 5 y gráfico 1.

Los valores de cadmio encontrados en los suelos se atribuyen en gran parte al riego agrícola practicado en estos suelos, con aguas del río Mantaro (14). Otro factor a considerar también, puede ser el uso de fertilizantes, en estos suelos agrícolas, especialmente los fosfatados, que contienen cadmio (51), indicando inclusive que en una evaluación usando el modelo de balance de masas, en 100 años de uso continuo de fertilizantes fosfatados con una relación de 60 mg Cd/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> podría incrementar el Cd en el suelo en 20%.

#### 4.1.3 Concentración de cadmio en las hojas de *maíz* (*Zea mays*)

**Tabla 8. Resultados del análisis de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*) (mg/kg)**

Tratamiento	Repeticiones		
	I	II	III
1: Quilcas (moderadamente ácido)	1,68	0,50	0,18
2: Sicaya (ligeramente ácido)	1,40	0,50	0,78
3: San Lorenzo (neutro)	0,93	0,91	1,45
4: Sincos (ligeramente alcalino)	1,60	0,83	0,68
5: Muquiyauyo (moderadamente alcalino)	0,85	1,30	1,23

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

Los contenidos de cadmio encontrados en las hojas de *maíz* (*Zea mays*) son bastante variables en cada suelo utilizado para el presente experimento, que varía en pH, lo cual puede explicarse debido a que el cadmio es fácilmente absorbido del suelo y es traslocado a los tejidos aéreos de la planta, y uno de estos caracteres es la absorción no regulada por límites fisiológicos (demanda de la planta) y la absorción de cadmio no incrementa con el aumento de concentraciones de cadmio en el suelo (55), como se observa en la tabla 8. Los datos promedio de cada tratamiento fueron comparados para determinar el efecto de los tratamientos.

**Tabla 9. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*)**

Orden de mérito	Tratamiento	Promedio (mg/kg)	Significación
1	5: Suelo Muquiyauyo (mod. alcalino)	1.127	a
2	4: Suelo Sincos (lig. alcalino)	1.037	a b
3	2: Suelo Sicaya (lig. ácido)	0.893	a b
4	3: Suelo San Lorenzo (neutro)	0.867	a b
5	1: Suelo Quilcas (mod. ácido)	0.418	b

Fuente: elaboración propia.

La prueba de significación de Duncan para los promedios de concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*), presenta a los tratamientos 5 (Suelo de Muquiyauyo, moderadamente alcalino), 4 (Suelo de Sincos (ligeramente alcalino), 2 (Suelo de Sicaya, ligeramente ácido) y 3 (Suelo de San Lorenzo, neutro), sin diferencias estadísticas significativas entre sí, superando al tratamiento 1 (Suelo de Quilcas, moderadamente ácido), mostrando que conforme se incrementa el pH del suelo donde crece el *maíz* (*Zea mays*), se tiene mayor concentración de cadmio en las hojas, debido a la mayor absorción, atribuible al pH que requiere este cultivo para su normal crecimiento, que es el pH neutro a alcalino. El mayor crecimiento del *maíz* (*Zea mays*) permitió mayor absorción de cadmio desde el suelo y su concentración en las hojas, entre otros elementos que absorbe la planta. Estos datos tienen relación con lo afirmado por investigadores (55), quienes reportan que el cadmio no tiene un rol fisiológico conocido en la planta, pero es fácilmente absorbido y traslocado a las partes aéreas de la planta. Los datos se presentan en la tabla 9.

Los datos de absorción de cadmio en *maíz* (*Zea mays*), en suelos de diferente pH del valle del Mantaro, contrastan a lo encontrado en Lima, donde con la aplicación de calcio (eleva el pH), se redujo la absorción de cadmio por la planta de *maíz* (*Zea mays*) (12). El factor principal, que se atribuye a estas diferencias es la naturaleza de los suelos, pues las características de los

suelos de Lima (costa), son diferentes a los del valle del Mantaro (Sierra), a pesar de tener pH similar, y el otro factor es que la aplicación de cal al suelo puede precipitar al cadmio y reducir de esa manera su absorción por la planta.

La concentración encontrada de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*), sí tiene relación con el contenido de cadmio en el suelo, antes del experimento, pues los suelos de Muquiyauyo y Sincos tuvieron, mayor concentración de cadmio total (Cd = 7.96 y 6.88 mg Cd/kg suelo, respectivamente), seguido de Quilcas y Sicaya (Cd = 1.45 y 1.61 mg/kg, respectivamente); estos cuatro suelos superaron en ECA (Estándar de Calidad Ambiental) de Perú, cuyo límite máximo permisible (LMP) es 1.4 mg Cd/kg; en cambio el suelo de San Lorenzo, no superó el ECA-Suelos del Perú (Cd = 1.22 mg/kg). Estos datos están relacionados, pues cuando es mayor el cadmio total en el suelo, mayor es la absorción de cadmio por las plantas de *maíz* (*Zea mays*) y su concentración en las hojas, pero cuando bajan las concentraciones de cadmio, la relación ya no es tan clara (99), que el cadmio total en el suelo explica menos del 50% de la varianza de las concentraciones de cadmio en el cultivo. Esto significa que las concentraciones totales de cadmio en el suelo son pobres predictoras del riesgo de cadmio. En el caso de los suelos del valle del Mantaro, esto se presenta cuando el cadmio se encuentra en bajas concentraciones.

#### 4.1.4 Contenido de cadmio en el suelo al final del experimento

**Tabla 10. Resultados del análisis de cadmio en el suelo (mg/kg)**

Tratamiento	Repeticiones		
	I	II	III
1: Quilcas (moderadamente ácido)	1.97	2.08	2.24
2: Sicaya (ligeramente ácido)	2.49	2.26	2.13
3: San Lorenzo (neutro)	2.09	2.10	1.97
4: Sincos (ligeramente alcalino)	8.12	7.95	8.36
5: Muquiyauyo (Moderadamente alcalino)	1.99	1.81	1.29

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

El contenido de cadmio total al final del experimento presenta al suelo de Sincos como el que tiene mayor concentración, respecto a los demás suelos evaluados. Todos los suelos presentan mayor concentración de cadmio que el Límite Máximo Permisible del ECA de suelos del Perú, que tiene un valor de 1.4 mg/kg, excepto la tercera repetición del suelo de Muquiyauyo, que presenta solo 1.29 mg Cd/kg suelo.

En relación al pH de cada suelo, se observa que el pH ligeramente alcalino del suelo de Sincos presenta mayor contenido de cadmio, comparado con los demás suelos, excepto con el suelo de Muquiyauyo que, a pesar de ser moderadamente alcalino, presenta menor contenido de cadmio, lo cual puede atribuirse a la precipitación (paso de fase líquida a fase sólida), debido a la formación de hidróxido de cadmio (21). Estos datos se presentan en la tabla 10.

**Tabla 11. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Contenido total de cadmio en 5 suelos de diferente pH del valle del Mantaro.**

Orden de mérito	Tratamiento	Promedio (mg/kg)	Significación
1	4: Suelo Sincos (lig. alcalino)	8.143	a
2	2: Suelo Sicaya (lig. ácido)	2.293	b
3	1: Suelo Quilcas (mod. ácido)	2.097	b c
4	3: Suelo San Lorenzo (neutro)	2.053	b c
5	5: Suelo Muquiyauyo (mod. alcalino)	1.697	c

Fuente: elaboración propia.

La prueba de significación de Duncan para el promedio del cadmio total disponible en los cinco suelos del valle del Mantaro, presenta al suelo de Sincos en primer lugar en orden de mérito (pH ligeramente alcalino), con 8.143 mg/kg, superando estadísticamente a los demás suelos, siendo el suelo de Muquiyauyo (moderadamente alcalino) el que ocupó el último lugar en orden de mérito, con solo 1.697 mg/kg. La disponibilidad de cadmio al final del experimento tuvo valores que han superado al contenido inicial en cada

suelo; es decir, la cantidad de cadmio total disponible en cada suelo se incrementó debido a la mayor liberación desde las formas intercambiables o ligeramente insolubles presentes en el suelo, que hicieron incrementar la disponibilidad de cadmio en el suelo. Estos datos muy variables coinciden con investigadores anteriores (99), quienes manifestaron que las concentraciones totales de cadmio en el suelo son pobres predictoras del riesgo de cadmio, en este caso para las plantas (absorción).

#### 4.1.5 Tasa de transferencia de cadmio del suelo hacia las hojas de *maíz* (*Zea mays*)

**Tabla 12. Resultados de la tasa de transferencia de cadmio del suelo hacia las hojas de *maíz* (*Zea mays*) (%)**

Tratamiento	Repeticiones		
	I	II	III
1: Quilcas (moderadamente ácido)	39.66	34.48	12.41
2: Sicaya (ligeramente ácido)	86.96	31.06	48.45
3: San Lorenzo (neutro)	76.23	74.59	62.38
4: Sincos (ligeramente alcalino)	20.10	10.43	8.54
5: Muquiayuyo (moderadamente alcalino)	12.35	18.90	17.88

Fuente: elaboración propia.

La tasa de transferencia de cadmio del suelo a las hojas de *maíz* (*Zea mays*) fue variable, siendo los suelos de pH moderadamente ácido (Quilcas), ligeramente ácido (Sicaya) y neutro (San Lorenzo), los que mostraron valores más altos, comparados a los suelos de pH ligeramente alcalino (Sincos) y moderadamente alcalino (Muquiayuyo). Estos datos concuerdan con lo afirmado por otros investigadores (5), quienes afirman que los datos de concentraciones de cadmio en el cultivo incrementan con la disminución del pH.



Además el efecto de las propiedades químicas de cada suelo, incluido el pH, también ha influido en la Tasa de Transferencia del suelo a la raíz; esto se debe a la diferente biodisponibilidad del cadmio en el suelo, que puede ser transferida a la planta, pues la biodisponibilidad de cadmio está relacionada a diferencias en la especiación del metal o metaloide, efectos interiónicos sobre la absorción de iones del agua en los poros y de los efectos indirectos de las propiedades del suelo sobre la translocación dentro de la planta. (21)

**Tabla 13. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Tasa de transferencia de cadmio del suelo hacia las hojas de *maíz* (*Zea mays*)**

Orden de mérito	Tratamiento	Promedio (%)	Significación
1	3: Suelo San Lorenzo (neutro)	71,067	a
2	2: Suelo Sicaya (lig. ácido)	55,490	a b
3	1: Suelo Quilcas (mod. ácido)	28,850	b c
4	5: Suelo Muquiyauyo (mod. alcalino)	16,377	c
5	4: Suelo Sincos (lig. alcalino)	13,023	c

Fuente: elaboración propia.

La prueba de comparación múltiple de Duncan para los promedios porcentuales de tasa de transferencia de cadmio, desde el suelo hacia las hojas de *maíz* (*Zea mays*), presenta a los suelos de San Lorenzo (neutro), y de Sicaya (ligeramente ácido) en los dos primeros lugares en orden de mérito, sin diferencias estadísticas entre sí, superando estadísticamente a los demás tratamientos (suelos de pH diferente). Los valores encontrados son relativamente altos y demuestran la alta tasa de transferencia del cadmio del suelo a la planta, pues el cadmio es fácilmente absorbido del suelo y es trasladado a los tejidos aéreos de la planta (55). Estos datos también corroboran lo explicado por otros investigadores, quienes afirman que la absorción de cadmio no está regulada por límites fisiológicos y la absorción de cadmio no incrementa con el aumento de concentraciones de cadmio en el suelo (56). En nuestro experimento, el suelo de San Lorenzo, así como el

suelo de Sicaya no tienen los más altos contenidos de cadmio, pero en estos suelos, la planta de *maíz* (*Zea mays*) mostró las más alta tasa de absorción de cadmio, si los comparamos con Sincos y Muquiyauyo que sí tuvieron mayor contenido de cadmio inicialmente, pero ocupan las más bajas tasas de absorción de cadmio en este experimento, posiblemente debido a la diferente biodisponibilidad de cadmio en el suelo. (21)

#### 4.1.6 Materia seca de la parte aérea

**Tabla 14. Resultados de la materia seca de la parte aérea de *maíz* (*Zea mays*) (g)**

Tratamiento	Repeticiones		
	I	II	III
1: Quilcas (moderadamente ácido)	8.65	8.47	10.43
2: Sicaya (ligeramente ácido)	8.06	10.42	9.06
3: San Lorenzo (neutro)	10.39	14.43	10.73
4: Sincos (ligeramente alcalino)	8.71	5.72	9.73
5: Muquiyauyo (moderadamente alcalino)	15.39	9.09	9.73

Fuente: elaboración propia.

Los datos de materia seca formada en cada unidad experimental, presentan variabilidad dentro de cada tratamiento como una expresión del crecimiento de la planta de *maíz* (*Zea mays*) sin un patrón relacionado al pH del suelo. Los datos se presentan en la tabla 14.

**Tabla 15. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Materia Seca de parte aérea de *maíz* (*Zea mays*)**

Orden de mérito	Tratamiento	Promedio (g)	Significación
1	3: Suelo San Lorenzo (neutro)	11.850	a
2	5: Suelo Muquiyauyo (mod. alcalino)	11.403	a
3	1: Suelo Quilcas (mod. ácido)	9.183	a
4	2: Suelo Sicaya (lig. ácido)	9.180	a
5	4: Suelo Sincos (lig. alcalino)	8.053	a

Fuente: elaboración propia.

La prueba de comparación múltiple de Duncan para los promedios de materia seca de la parte aérea, no presenta diferencias estadísticas entre tratamientos, debido a que la presencia de cadmio en el suelo y la tasa de absorción por la planta, no afectó la acumulación de materia seca de la planta de *maíz* (*Zea mays*), utilizada como indicadora en este experimento. Estos datos también permiten sugerir investigar el carácter tolerante del *maíz* (*Zea mays*) para el cadmio del suelo, como lo sustentan otros investigadores (18), quienes trabajaron con arveja en 11 localidades situadas en Francia y Suecia, y cuyos resultados mostraron que no existieron diferencias entre las localidades francesas y suecas con respecto a la tolerancia de cadmio en arveja. Todos los cultivares investigados respondieron en términos de absorción de cadmio a las diferencias en la exposición al cadmio en las diferentes localidades. Los investigadores sugirieron que la diferencia en el material genético podría ser cuidadosamente investigada y explotada para mejorar la tolerancia a la exposición de cadmio. Los datos se presentan en la tabla 15.

#### 4.1.7 Materia seca de la raíz

**Tabla 16. Resultados de la materia seca de la raíz de *maíz* (*Zea mays*) (g)**

Tratamiento	Repeticiones		
	I	II	III
1: Quilcas (moderadamente ácido)	2.71	3.45	3.22
2: Sicaya (ligeramente ácido)	2.81	2.76	2.43
3: San Lorenzo (neutro)	2.91	4.44	3.15
4: Sincos (ligeramente alcalino)	2.96	3.03	2.87
5: Muquiyauyo (moderadamente alcalino)	3.24	2.14	3.05

Fuente: elaboración propia.

Los datos de materia seca de la raíz como indicador del crecimiento de la planta de *maíz* (*Zea mays*) no presentan mayor variabilidad, que pueda ser atribuido al pH de los suelos de cada localidad. Estos datos se presentan en la tabla 16.

**Tabla 17. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Materia Seca de raíz de maíz (*Zea mays*)**

Orden de mérito	Tratamiento	Promedio (g)	Significación
1	3: Suelo San Lorenzo (neutro)	3.500	a
2	1: Suelo Quilcas (mod. ácido)	3.127	a
3	5: Suelo Muquiyauyo (mod. alcalino)	2.953	a
4	4: Suelo Sincos (lig. alcalino)	2.810	a
5	2: Suelo Sicaya (lig. ácido)	2.667	a

Fuente: elaboración propia.

La prueba de significación de Duncan para los promedios de tratamientos de materia seca de raíz de *maíz (Zea mays)*, no presentan diferencias estadísticas significativas entre sí, demostrando que la presencia de cadmio en suelos contaminados con este metal pesado, y que tienen diferente pH, no afectaron la formación de materia seca en la raíz de la planta. Los datos encontrados variaron entre 3.500 g (Suelo de San Lorenzo, neutro) y 2.667 g (Suelo de Sicaya, ligeramente ácido) (Tabla 17).

#### 4.1.8 Altura de planta de *maíz (Zea mays)*

**Tabla 18. Resultados de altura de planta de *maíz (Zea mays)* (cm) al final del experimento**

Tratamiento	Repeticiones		
	I	II	III
1: Quilcas (moderadamente ácido)	27.33	30.33	36.33
2: Sicaya (ligeramente ácido)	24.30	29.30	23.30
3: San Lorenzo (neutro)	32.50	31.33	30.33
4: Sincos (ligeramente alcalino)	32.67	28.33	31.33
5: Muquiyauyo (moderadamente alcalino)	31.67	29.83	30.33

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 19. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Altura de planta de maíz (*Zea mays*)**

Orden de mérito	Tratamiento	Promedio (cm)	Significación
1	3: Suelo San Lorenzo (neutro)	31.387	a
2	1: Suelo Quilcas (mod. ácido)	31.330	a
3	4: Suelo Sincos (lig. alcalino)	30.777	a b
4	5: Suelo Muquiyauyo (mod. alcalino)	30.610	a b
5	2: Suelo Sicaya (lig. ácido)	25.633	b

Fuente: elaboración propia.

La prueba de significación de Duncan para los promedios de altura de planta de *maíz* (*Zea mays*) de los tratamientos en estudio presenta ligeras diferencias estadísticas significativas, siendo los tratamientos 3 (Suelo de San Lorenzo, pH neutro), 1 (Suelo de Quilcas, moderadamente ácido), 4 (Suelo de Sincos, ligeramente alcalino) y 5 (Suelo de Muquiyauyo, moderadamente alcalino), los que ocuparon los 4 primeros lugares en orden de mérito, sin diferencias estadísticas entre sí. El suelo de Sicaya (tratamiento 2: ligeramente ácido), ocupó el último lugar en orden de mérito, sin diferencias estadísticas con el suelo de Sincos y Muquiyauyo. No se observa un claro efecto del suelo contaminado con cadmio en la altura de planta de *maíz* (*Zea mays*). Los datos se presentan en la tabla 19.

#### 4.1.9 Longitud de la raíz

**Tabla 20. Resultados de la longitud de la raíz de *maíz* (*Zea mays*)**

Tratamiento	Repeticiones		
	I	II	III
1: Quilcas (moderadamente ácido)	24.00	22.00	25.67
2: Sicaya (ligeramente ácido)	29.70	20.70	28.00
3: San Lorenzo (neutro)	25.67	30.00	32.00
4: Sincos (ligeramente alcalino)	26.67	29.00	23.33
5: Muquiyauyo (moderadamente alcalino)	31.00	19.33	28.33

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 21. Prueba de significación de Duncan para tratamientos. Longitud de raíz de *maíz* (*Zea mays*)**

Orden de mérito	Tratamiento	Promedio (cm)	Significación
1	3: Suelo San Lorenzo (neutro)	29.223	a
2	4: Suelo Sincos (lig. alcalino)	26.333	a
3	5: Suelo Muquiyauyo (mod. alcalino)	26.220	a
4	2: Suelo Sicaya (lig. ácido)	26.133	a
5	1: Suelo Quilcas (mod. ácido)	23.890	a

Fuente: elaboración propia.

La prueba de comparación múltiple de Duncan para los promedios de los tratamientos en longitud de raíz de *maíz* (*Zea mays*), no presenta diferencias estadísticas significativas entre los cinco tratamientos (tipos de suelo contaminados con cadmio del valle del Mantaro) en estudio. Esto se atribuye a que el crecimiento de la raíz, en este corto periodo de evaluación experimental, no es influenciado por factores como la concentración de cadmio o pH del suelo.

Los valores promedio de longitud de raíz de *maíz* (*Zea mays*) variaron entre 29.223 cm (Tratamiento 3: Suelo San Lorenzo, pH neutro) a 23.890 cm

(tratamiento 5: suelo Quilcas, moderadamente ácido). Los datos se presentan en la tabla 21.

#### 4.1.10 Correlación y Regresión

**Tabla 22. Correlación entre la concentración de cadmio en hojas de *maíz fd* (*Zea mays*) y cadmio disponible en el suelo, cadmio inicial y tasa de transferencia de cadmio.**

Variables	r calculado	r tablas		r <sup>2</sup>	Significación
		0.05	0.01		
X = Cd suelo Y = Cd hojas	0.1986	0.514	0.641	0.039	ns
X = Cd inicial Y = Cd hojas	0.4599	0.514	0.641	0.2116	ns
X = TT Y = Cd hojas	0.1814	0.514	0.641	0.0329	ns
X = pH suelo Y = Cd hojas	0.5989	0.514	0.641	0.3587	*

Fuente: elaboración propia.

El análisis de correlación entre las concentraciones de cadmio en hojas y disponibilidad de cadmio en el suelo al final del experimento, cadmio inicial en el suelo, y tasa de transferencia de cadmio del suelo a las hojas, no presentan diferencias estadísticas significativas ( $r$  de las tablas  $>$   $r$  calculado), indicando que estas variables no están relacionadas; es decir la concentración de cadmio en las hojas de la planta de *maíz* (*Zea mays*), que crecieron en suelos contaminados con cadmio no permiten predecir los factores que lo afectan (Tabla 22).

Estos resultados confirman lo expresado por otros investigadores (99), quienes reportaron que en condiciones de idéntico cadmio en el suelo, el cadmio en el cultivo varía en más de 10 veces. Esto significa que las concentraciones totales de cadmio en el suelo son pobres predictoras del riesgo de cadmio en el suelo.

La ventaja de los datos encontrados, al margen de ausencia de relación con el contenido en el suelo, es su carácter de fitoextracción, es decir, sembrando *maíz* (*Zea mays*) y tratando sus materiales vegetativos a través de la quema, se pueden descontaminar los suelos con cadmio. El *maíz* (*Zea mays*) es un cultivo común en el valle del Mantaro, y sus partes vegetativas (hojas) concentran cadmio, como mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados.

La correlación entre el pH de los suelos en estudio y la concentración de cadmio en las hojas de *maíz* (*Zea mays*), sí presenta diferencias estadísticas significativas ( $r$  calculado  $>$   $r$  tablas 0.05), es decir, cuando el pH aumenta en el suelo, también la concentración de cadmio en las hojas de *maíz* (*Zea mays*); y cuando el pH es más ácido (disminuye) en el suelo, la concentración de cadmio en las hojas de *maíz* (*Zea mays*) disminuye, debido posiblemente a que el cultivo de *maíz* (*Zea mays*) crece bien en suelos de pH neutro a alcalino, y cuando el pH es bajo, disminuye su crecimiento y su absorción de elementos del suelo.

**Tabla 23. Análisis de varianza de la regresión entre el pH del suelo y concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*)**

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Fc	p-valor
Regresión	1	0.7276	0.7276	7.27	0.0183
Error	13	1.3009	0.1000		
Total	14				

Fuente: elaboración propia.

El análisis de varianza de la regresión entre el pH del suelo y la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*) presenta diferencias estadísticas significativas ( $p$ -valor  $<$  0.05) en la fuente de regresión, indicando



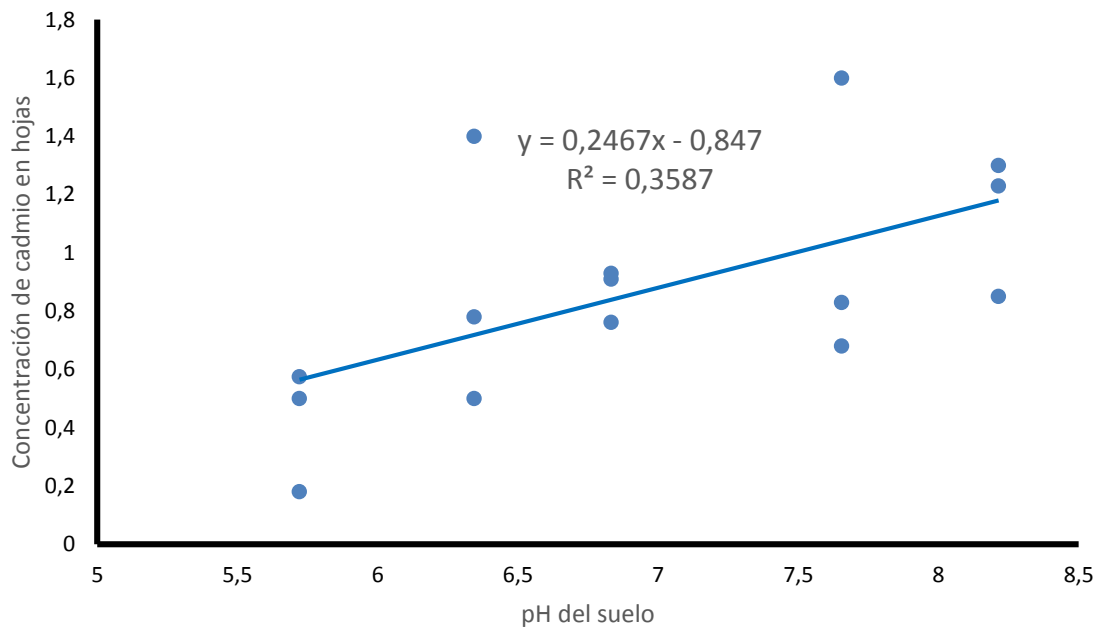
que el pH del suelo influye en la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*) (Tabla 23).

La ecuación de regresión estimada fue:

$$\text{Cd hojas} = -0.847 + 0.2467 \text{ pH suelo}$$

Esta ecuación muestra que, por cada incremento en una unidad de pH del suelo, la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*) se incrementa en 0.2467 mg/kg. Esto indica que el *maíz* (*Zea mays*) puede absorber cadmio de suelos contaminados y almacenarlo en las hojas (gráfico 2).

Gráfico 3. Regresión y correlación entre pH del suelo y concentración de cadmio en hojas de maíz (*Zea mays*)



Fuente: elaboración propia.

## 4.2 Discusión

El estudio determinó que la concentración de cadmio en las hojas de maíz (*Zea mays*) es alta de acuerdo al incremento de pH del suelo, la correlación entre el pH de los suelos en estudio y la concentración de cadmio en las hojas de maíz (*Zea mays*), sí presenta diferencias estadísticas significativas ( $r$  calculado  $>$   $r$  tablas 0.05), es decir, cuando el pH aumenta en el suelo, también la concentración de cadmio en las hojas de maíz (*Zea mays*), y cuando el pH es más ácido (disminuye) en el suelo, la concentración de Cd en las hojas disminuye. La mayor acumulación de Cd en las hojas también fue reportado en el trabajo de investigación titulado: “*Chromium, Nickel, Cadmium, and Lead Accumulation in Maize, Sunflower, Willow, and Poplar*” donde la más alta translocación se puede corroborar donde se observó que la más alta translocación desde las raíces de las plantas a la parte aérea de maíz (*Zea mays*) y girasol fue hallada en el caso de Cd y Pb (57 y 83% de Cd, 56 y 76% de Pb). (16)

El incremento de la concentración de Cd en hojas con el incremento de pH también se debe a que los suelos alcalinos de Muquiyauyo y Sincos tenían mayor concentración de Cd total por lo que la planta absorbió mayor cantidad de Cd y lo concentró en las hojas, esos datos también se sustentan en (56) donde se afirma que las concentraciones de Cd en el cultivo no están reguladas por límites fisiológicos o demanda de la planta, y la absorción incrementó linealmente con el Cd en suelo cuando las propiedades permanecen constantes.

La fijación de Cd es mayor en los suelos con textura más fina, el movimiento del agua y del aire a través del suelo depende de la porosidad del mismo, característica que está definida con gran disposición por la estructura. La estructura granular proporciona la porosidad adecuada para la buena infiltración del agua y un excelente intercambio de aire entre el suelo y la atmósfera (26). Esto crea un medio físico ideal para el crecimiento de las plantas, por ende, los suelos que tienen partículas finas tienen un mejor crecimiento y esto se asume como una mejor absorción de Cd. (100)

## **CAPÍTULO V CONCLUSIONES**

1. La concentración de cadmio en las hojas de *maíz* (*Zea mays*) varió de 1.127 mg /kg (suelo de Muquiyauyo, moderadamente alcalino) a 0.418 mg/kg (Suelo de Quilcas, moderadamente ácido), sobresaliendo el suelo de Muquiyauyo respecto a los demás suelos. Se observó que los suelos con más alto pH permiten concentrar más cadmio en las hojas de *maíz* (*Zea mays*), respecto a los suelos con más bajo pH.
2. La disponibilidad de cadmio fue mayor en los suelos de pH ligeramente alcalino (Sincos = 7.96 mg Cd/kg) y moderadamente alcalinos (Muquiyauyo = 6.88 mg Cd/kg), respecto a los suelos ligeramente ácidos (Sicaya = 1.61 mg Cd/kg), moderadamente ácidos (Quilcas = 1.45 mg Cd/kg); y neutros (San Lorenzo = 1.22 mg Cd/kg). Los suelos de Sincos, Muquiyauyo, Quilcas y Sicaya, superaron los Límites Máximos Permisibles del ECA de suelos del Perú, y se consideran suelos contaminados con cadmio.
3. La correlación y regresión entre el contenido inicial de cadmio en el suelo y la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*) no fue estadísticamente significativa, no pudiendo afirmarse que hubo relación entre estas variables. El cadmio total disponible en el suelo no predice adecuadamente la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*).
4. El suelo de Sincos, de pH ligeramente alcalino (pH = 7.654) tuvo la mayor disponibilidad de cadmio, en forma estadísticamente significativa, respecto a los demás suelos, siendo los valores encontrados, superiores a la concentración total de cadmio

disponible al inicio del experimento, excepto en el suelo de Muquiyauyo, indicando un incremento en la disponibilidad de cadmio, durante el crecimiento de *maíz* (*Zea mays*), como resultado de las interacciones suelo-planta.

5. La tasa de transferencia de cadmio del suelo a las hojas de *maíz* (*Zea mays*), fue superior estadísticamente en los suelos de San Lorenzo (pH neutro) y Sicaya (pH ligeramente ácido), respecto a los demás suelos del experimento.
6. No se encontró significación estadística para materia seca de planta, longitud de raíz, y materia seca de raíz, en los diferentes suelos contaminados con cadmio, excepto para altura de planta, con ligeras diferencias estadísticas, sobresaliendo con mayor altura de planta, los suelos de San Lorenzo (neutro) y Quilcas (moderadamente ácido).
7. No se encontró correlación y regresión estadísticamente significativa entre la concentración de cadmio en hojas de *maíz* (*Zea mays*) y cadmio disponible al final del experimento, cadmio disponible al inicio del experimento, y tasa de transferencia de cadmio del suelo a la hoja; sí se encontró correlación y regresión estadísticamente significativa entre la concentración de cadmio en hojas y el pH de los suelos en estudio; esta fue directa.

## **RECOMENDACIONES**

1. Evaluar a nivel experimental, la concentración de cadmio en hojas, tallos y raíces de las principales especies cultivadas en el valle del Mantaro, caracterizando el pH de los suelos.
2. Caracterizar las propiedades de los suelos del valle del Mantaro contaminados con cadmio, que tengan diferente pH.
3. Relacionar las propiedades físicas y químicas de los suelos contaminados con cadmio en el valle del Mantaro, para relacionarlos con la disponibilidad de cadmio, como base para la remediación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LI, Yin-Ming, CHANEY, Rufus L., SCHNEITER, Albert A. y MILLER, Jerry F. Genotype Variation in Kernel Cadmium Concentration in Sunflower Germplasm under Varying Soil Conditions. *Crop Science* [online]. 1995. Vol. 35, no. 1, p. 137.
2. ZHANG, Lei y SONG, Fengbin. Cadmium Uptake and Distribution by Different Maize Genotypes in Maturing Stage. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* [online]. mayo 2008. Vol. 39, no. 9, p. 1517–1531.
3. TUDOREANU, L. y PHILLIPS, C.J.C. Modeling Cadmium Uptake and Accumulation in Plants. In : *Advances In Agronomy* [online]. Elsevier Academic Press Inc, 2004. p. 121–157.
4. ARAO, T., AE, N., SUGIYAMA, M. y TAKAHASHI, M. Genotypic differences in cadmium uptake and distribution in soybeans. *Plant and Soil* [online]. 2003. Vol. 251, no. 2, p. 247–253.
5. ERIKSSON, Jan E. A field study on factors influencing Cd levels in soils and in grain of oats and winter wheat. *Water, Air, and Soil Pollution* [online]. septiembre 1990. Vol. 53, no. 1–2, p. 69–81.
6. FLORIJN, P. J. y VAN BEUSICHEM, M. L. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines. *Plant and Soil* [online]. marzo 1993. Vol. 150, no. 1, p. 25–32.
7. LIU, Jianguo, ZHU, Qingsen, ZHANG, Zujian, XU, Jiakuan, YANG, Jianchang y WONG, Ming H. Variations in cadmium accumulation among rice cultivars and types and the selection of cultivars for reducing cadmium in the diet. *Journal of the Science of Food and Agriculture* [online]. 15 enero 2005. Vol. 85, no. 1, p. 147–153.
8. BARANČÍKOVÁ, Gabriela, MADAMS, Mikuláš y RYBÀR, Ondrej. Crop contamination by selected trace elements. *Journal of Soils and Sediments* [online]. marzo 2004. Vol. 4, no. 1, p. 37–42.
9. ADRIANO, Domy C. Trace Elements in Terrestrial Environments. *Trace Elements in Terrestrial Environments* [online]. 2001. P. 263–314.
10. BASTA, N T, RYAN, J A y CHANEY, R L. Trace element chemistry in residual-treated soil: key concepts and metal bioavailability. *Journal of environmental quality*

- [online]. 2004. Vol. 34, no. 1, p. 49–63.
11. SZABÓ, Lajos y FODOR, László. Uptake of microelements by crops grown on heavy metal-amended soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* [online]. junio 2006. Vol. 37, no. 15–20, p. 2679–2689.
  12. CUENCA, E.W. *Efecto de la materia orgánica y fuentes de calcio en la toxicidad de cadmio en maíz (Zea mays L.)* [online]. 2012.
  13. ABANTO, M. Alexandra. Fuentes fosfatadas en dos suelos en la concentración de cadmio foliar en maíz bajo condiciones de invernadero. *Fuentes fosfatadas en dos suelos en la concentración de cadmio foliar en maíz bajo condiciones de invernadero* [online]. 2016.
  14. PROYECTO MANTARO REVIVE. Avances de resultados de la evaluación de calidad ambiental de los recursos agua y suelo. Caritas arquidiocesana de Huancayo. *Avances de resultados de la evaluación de calidad ambiental de los recursos agua y suelo.* [online]. 2007.
  15. MOJIRI, Amin. The Potential of Corn (*Zea mays*) for Phytoremediation of Soil Contaminated with Cadmium and Lead. *J. BIOL. ENVIRON. SCI* [online]. 2011. Vol. 5, no. 13, p. 17–22.
  16. KACALKOVA L., P. TLUSTOS, and J. Szakova. Chromium, Nickel, Cadmium, and Lead Accumulation in Maize, Sunflower, Willow, and Poplar. *Pol. J. Environ. Stud.* [online]. 2014. Vol. 23. [
  17. WANG, Min, ZOU, Jinhua, DUAN, Xuchuan, JIANG, Wusheng y LIU, Donghua. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays L.*). *Bioresource Technology* [online]. enero 2007. Vol. 98, no. 1, p. 82–88.
  18. ENGQVIST, Göran y MÅRTENSSON, Anna. Cadmium uptake in field pea cultivars grown under French and Swedish conditions. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science* [online]. marzo 2005. Vol. 55, no. 1, p. 64–67.
  19. KAUR, N., SINGH, D. y HUNDAL, H. S. Adsorption and desorption of native and added cadmium in relation to properties of some alluvial soils in Punjab. *JOURNAL-INDIAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE* [online]. 2004. Vol. 52, p. 426–433.

20. ANDERSEN, Martin K., REFSGAARD, Anne, RAULUND-RASMUSSEN, Karsten, STROBEL, Bjarne W. y HANSEN, Hans C. B. Content, distribution, and solubility of cadmium in arable and forest soils. *Soil Science Society of America Journal* [online]. 1 noviembre 2002. Vol. 66, no. 6, p. 1829–1835.
21. J., Alloway Brian. Heavy Metals in Soils. In: *Heavy Metals in Soils* [online]. 2013. p. 283–311.
22. HERNÁNDEZ, Ana Jesús y PASTOR PIÑEIRO, Jesús. El Impacto Ambiental de la Minería y de los Residuos Urbanos e Industriales. Sensibilización científica y desafíos para la ciudadanía dominicana. [online]. 2013.
23. LUO, Chunling, SHEN, Zhenguo y LI, Xiangdong. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. *Chemosphere* [online]. marzo 2005. Vol. 59, no. 1, p. 1–11.
24. VALDÉS, María. y MEDINA JARITZ, Nora. *Ecología microbiana del suelo* [online]. Instituto Politécnico Nacional, 2005.
25. FAO. Guía para la descripción de suelos. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación* [online]. 2009. P. 100.
26. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria PRONATTA. [online]. 1998.
27. REYES-NAVARRETE, M. G., A. I. A.-D. L. PEÑA, D. M. ANTUNA, A. G.-, VARGAS, L. y S.GONZÁLEZ-VALDEZ Y E. D. C. V. -ALARCÓN. Metales pesados: importancia y análisis. *Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango, Instituto Politécnico Nacional* [online]. 2010.
28. ZHANG, Chunxia, APPEL, Erwin y QIAO, Qingqing. Heavy metal pollution in farmland irrigated with river water near a steel plant-magnetic and geochemical signature. *Geophysical Journal International* [online]. 1 marzo 2013. Vol. 192, no. 3, p. 963–974.
29. BALTAZAR, C. D. L. y J. A. A. Campos. Proteínas queladoras de metales pesados en plantas hiperacumuladoras. *Proteínas queladoras de metales pesados en plantas hiperacumuladoras* [online]. 2012.



30. MUSSALI-GALANTE, Patricia, TOVAR-SÁNCHEZ, Efraín, VALVERDE, Mahara y ROJAS DEL CASTILLO, Emilio. Biomarkers of Exposure for Assessing Environmental Metal Pollution: From Molecules To Ecosystems. *Rev. Int. Contam. Ambie.* [online]. 2013. Vol. 29, no. 1, p. 117–140.
31. CARTAYA, Omar; REYNALDO, Inés; PENICHE, Carlos; GARRIDO, María. Empleo de polímeros como alternativa para la remediación de suelos contaminados por metales pesados. *Rev. Int. Contam. Ambie* [online]. 2011. Vol. 27, no. 1, p. 41–46.
32. MACNAIR, Mark R. Within and between population genetic variation for zinc accumulation in *Arabidopsis halleri*. *New Phytologist* [online]. 1 julio 2002. Vol. 155, no. 1, p. 59–66.
33. BAKER, A. J M, MCGRATH, S. P., SIDOLI, C. M D y REEVES, R. D. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. junio 1994. Vol. 11, no. 1–4, p. 41–49.
34. ZHAO, Fang-Jie, HAMON, Rebecca E, LOMBI, Enzo, MCLAUGHLIN, Mike J y MCGRATH, Steve P. Characteristics of cadmium uptake in two contrasting ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Journal of Experimental Botany* [online]. marzo 2002. Vol. 53, no. 368, p. 535–543.
35. BECERRIL, J. M., BARRUTIA, O., GARCÍA PLAZAOLA, J.L., HERNÁNDEZ, A. Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. *Ecosistemas* [online]. 2007. Vol. 16, no. 2, p. 50–55.
36. PUSCHENREITER, Markus, STÖGER, Gudrun, LOMBI, Enzo, HORAK, Othmar y WENZEL, Walter W. Phytoextraction of heavy metal contaminated soils with *Thlaspi goesingense* and *Amaranthus hybridus*: Rhizosphere manipulation using EDTA and ammonium sulfate. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* [online]. 1 diciembre 2001. Vol. 164, no. 6, p. 615–621.
37. ROSS, Sheila M. *Sources and forms of potentially toxic metals in soil-plant systems* [online]. John Wiley and Sons Ltd, 1994.
38. RIEUWERTS, J. S., THORNTON, I., FARAGO, M. E. y ASHMORE, M. R. Factors

- influencing metal bioavailability in soils: Preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation and Bioavailability* [online]. 12 enero 1998. Vol. 10, no. 2, p. 61–75.
39. BOEKHOLD, A. E., TEMMINGHOFF, E. J.M. y VAN DER ZEE, S. E.A.T.M. Influence of electrolyte composition and pH on cadmium sorption by an acid sandy soil. *Journal of Soil Science* [online]. 1 marzo 1993. Vol. 44, no. 1, p. 85–96.
  40. MSAKY, J. J. y CALVET, R. Adsorption behavior of copper and zinc in soils: influence of pH on adsorption characteristics. *Soil Science* [online]. 1990. Vol. 150, no. 2, p. 513–522.
  41. MCLEAN, Joan E y BLEDSOE, Bert E. Behavior of Metals in Soils. *Office of Research and Development* [online]. 1992. Vol. EPA/540/S-, p. 1–25.
  42. EVANS, L. J. Chemistry of metal retention by soils. *Environmental Science and Technology* [online]. septiembre 1989. Vol. 23, no. 9, p. 1046–1056.
  43. SILVA, Martín M. *Materia orgánica: Su utilización en la evaluación de la calidad del suelo en distintos ambientes del sur de Santa Fe* [online]. 2004.
  44. SPOSITO, G. THE CHEMISTRY OF SOILS. *Science* [online]. 1892. P. 29–30.
  45. BASTA, N. T., PANTONE, D. J. y TABATABAI, M. A. Path analysis of heavy metal adsorption by soil. *Agronomy Journal* [online]. 1993. Vol. 85, no. 5, p. 1054–1057.
  46. BASTA, N. T. y TABATABAI, M. A. EFFECT OF CROPPING SYSTEMS ON ADSORPTION OF METALS BY SOILS. *Soil Science* [online]. abril 1992. Vol. 153, no. 4, p. 331–337.
  47. BOHN, H; MCNEAL, B; O’CONNOR, G. Soil chemistry. *Department of Land, Air, and Water Resources, University of California* [online]. 2002.
  48. CUYPERS, Ann, REMANS, Tony, WEYENS, Nele y COLPAERT, Jan. *Heavy Metals in Soils* [online]. 2013.
  49. WBMS WORLD BUREAU OF METAL STATISTICS. World Bureau of Metal Statistics. World Nickel/Tin/Cadmium statistics-Cadmium. World Bureau of Metal Statistics, UK:Hertfordshire. 2009. *World Bureau of Metal Statistics. World Nickel/Tin/Cadmium statistics-Cadmium. World Bureau of Metal Statistics,*

- UK:Hertfordshire. [online]. 2009.
50. GROSBOIS, C., MEYBECK, M., HOROWITZ, A. y FICHT, A. The spatial and temporal trends of Cd, Cu, Hg, Pb and Zn in Seine River floodplain deposits (1994-2000). *Science of the Total Environment* [online]. 1 marzo 2006. Vol. 356, no. 1-3, p. 22-37.
  51. NZIGUHEBA, Generose y SMOLDERS, Erik. Inputs of trace elements in agricultural soils via phosphate fertilizers in European countries. *Science of the Total Environment* [online]. 1 febrero 2008. Vol. 390, no. 1, p. 53-57.
  52. LOGANATHAN, Paripurnanda, VIGNESWARAN, Saravanamuthu, KANDASAMY, Jaya y NAIDU, Ravi. *Cadmium sorption and desorption in soils: A review* [online]. marzo 2012. Taylor & Francis Group.
  53. CHRISTENSEN, Thomas H. Cadmium soil sorption at low concentrations: I. Effect of time, cadmium load, pH, and calcium. *Water, Air, and Soil Pollution* [online]. enero 1984. Vol. 21, no. 1-4, p. 105-114.
  54. BUEKERS, J., DEGRYSE, F., MAES, A. y SMOLDERS, E. Modelling the effects of ageing on Cd, Zn, Ni and Cu solubility in soils using an assemblage model. *European Journal of Soil Science* [online]. 1 diciembre 2008. Vol. 59, no. 6, p. 1160-1170.
  55. MCLAUGHLIN, M., WHATMUFF, M., WARNE, M., HEEMSBERGEN, D., BARRY, G., BELL, M., NASH, D. y PRITCHARD, Deborah. A Field Investigation of Solubility and Food Chain Accumulation of Biosolid-Cadmium Across Diverse Soil Types. *Environmental Chemistry* [online]. 28 octubre 2009. Vol. 3, p. 428-432.
  56. BROWN, Sally L., CHANEY, Rufus L., ANGLE, J. Scott y RYAN, James A. The Phytoavailability of Cadmium to Lettuce in Long-Term Biosolids-Amended Soils. *Journal of Environmental Quality* [online]. 1998. Vol. 27, no. 5, p. 1071-1078.
  57. ERIKSSON, J., OEBORN, I., JANSSON, G. y ANDERSSON, A. Factors influencing Cd-content in crops. Results from Swedish field investigations. *Swedish Journal of Agricultural Research (Sweden)* [online]. 1996. No. July.
  58. MCLAUGHLIN, M.L., SMOLDERS, E., DEGRYSE, F. AND RIETRA, R. Uptake of Metals from Soil into Vegetables. In : *Dealing with Contaminated Sites* [online].

- Springer, 2011. p. 325–367.
59. GARCÍA, Gregorio, ZANUZZI, Andrea L. y FAZ, Ángel. Evaluation of heavy metal availability prior to an in situ soil phytoremediation program. In : *Biodegradation* [online]. Kluwer Academic Publishers, marzo 2005. p. 187–194.
  60. DIEZ LÁZARO, J. *Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados : Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas* [online]. Universidade de Santiago de Compostela, Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, 2008.
  61. NAVAS, Ana y LINDHORFER, Harald. Geochemical speciation of heavy metals in semiarid soils of the central Ebro Valley (Spain). *Environment International* [online]. abril 2003. Vol. 29, no. 1, p. 61–68.
  62. EVANS, L. J., SPIERS, G. A. y ZHAO, G. Chemical aspects of heavy metal solubility with reference to sewage sludge amended soils. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* [online]. abril 1995. Vol. 59, no. 2–4, p. 291–302.
  63. BLUME, Hans-Peter, BRÜMMER, Gerhard W, HORN, Rainer, KANDELER, Ellen, KÖGEL-KNABNER, Ingrid, KRETZSCHMAR, Ruben, STAHR, Karl, WILKE MIT BEITRÄGEN VON SÖREN THIELE-BRUHN, Berndt-Michael, WELP PROFESSOR HC HANS-PETER BLUME, Gerhard, GERHARD BRÜMMER, Professor W, RAINER HORN, Professor, ELLEN KANDELER, Professor, INGRID KÖGEL-KNABNER, Professor, RUBEN KRETZSCHMAR, Professor, KARL STAHR, Professor, BERNDT-MICHAEL WILKE, Professor, SÖREN THIELE-BRUHN, Professor y GERHARD WELP, Priv-Doz. Lehrbuch der Bodenkunde. [online].
  64. GADDE, R. Rao. y LAITINEN, Herbert A. Studies of Heavy Metal Adsorption by Hydrous Iron and Manganese Oxides. *Analytical Chemistry* [online]. noviembre 1974. Vol. 46, no. 13, p. 2022–2026.
  65. STUMM MORGAN, J. J., W. *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*. Wiley, 1996. ISBN 0471511854.
  66. SPOSITO, G. *The surface chemistry of soils*. Oxford university Press, New York.

- [online]. 1984. New York, NY (USA) Oxford Univ. Press.
67. ESSINGTON, Michael E. *Soil and water chemistry: an integrative approach* [online]. 2004.
  68. BINGHAM, F.T., MITCHELL, G.A., MAHLER R.J., PAGE, A.L. 1976, English, Conference Proceedings edition: International Conference on Environmental Sensing and Assessment, September 14-19, 1975, Las Vegas, Nevada. *International Conference on Environmental Sensing and Assessment, September 14-19, 1975, Las Vegas, Nevada* [online]. 1976.
  69. MCBRIDE, M.B. *Environmental Chemistry of Soils*. New York, New York: Oxford University Press. Oxford University Press, 1994. ISBN 0195070119.
  70. KELLY, Martyn. Heavy Metals in the Aquatic Environment. In : *Mining and the Freshwater Environment* [online]. Dordrecht : Springer Netherlands, 1988. p. 16–32.
  71. CAMPBELL, P. G. C. Interactions between trace metals and aquatic organisms: a critique of the free-ion activity model. In : *Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems* [online]. 1995. p. 45–102.
  72. KNIGHT, Bruce y MCGRATH, Steve P. A method to buffer the concentrations of free Zn and Cd ions using a cation exchange resin in bacterial toxicity studies. *Environmental Toxicology and Chemistry* [online]. 1 diciembre 1995. Vol. 14, no. 12, p. 2033–2039.
  73. RAURET, G, LÓPEZ-SÁNCHEZ, J F, SAHUQUILLO, A, RUBIO, R, DAVIDSON, C, URE, A y QUEVAUVILLER, Ph. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials. *Journal of Environmental Monitoring* [online]. febrero 1999. Vol. 1, no. 1, p. 57–61.
  74. KAASALAINEN, Marika y YLI-HALLA, Markku. Use of sequential extraction to assess metal partitioning in soils. *Environmental Pollution* [online]. 2003. Vol. 126, no. 2, p. 225–233.
  75. PICKERING, W. F. Metal ion speciation - soils and sediments (a review). *Ore Geology Reviews* [online]. 1 mayo 1986. Vol. 1, no. 1, p. 83–146.

76. SEARLE, G D. The Science of the Total Environment. *Science of the total environment* [online]. 1996. Vol. 178, p. 1996.
77. DUSHENKOV, Viatcheslav, KUMAR, P. B. A. Nanda., MOTTO, Harry. y RASKIN, Ilya. Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science and Technology* [online]. mayo 1995. Vol. 29, no. 5, p. 1232–1238.
78. ENTRY, James A., VANCE, Nan C., HAMILTON, Melinda A., ZABOWSKI, Darlene, WATRUD, Lidia S. y ADRIANO, Domy C. Phytoremediation of soil contaminated with low concentrations of radionuclides. *Water, Air, and Soil Pollution* [online]. 1996. Vol. 88, no. 1, p. 167–176.
79. MCGRATH, S. P. y BROOKS, R. R. Plants that hyperaccumulate heavy metals: their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining. *Phytoextraction for soil remediation*. [online]. 1998. P. 261–287.
80. CUNNINGHAM, Scott D., BERTI, William R. y HUANG, Jianwei W. Phytoremediation of contaminated soils. *Trends in Biotechnology* [online]. 1 septiembre 1995. Vol. 13, no. 9, p. 393–397.
81. RASKIN, Ilya, KUMAR, PBA Nanda, DUSHENKOV, Slavik y SALT, David E. Bioconcentration of heavy metals by plants. *Current Opinion in Biotechnology* [online]. junio 1994. Vol. 5, no. 3, p. 285–290.
82. BAKER, A J M y BROOKS, R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements - a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* [online]. 1 enero 1989. Vol. 1, no. 2, p. 81–126.
83. BOYD, Robert S., SHAW, Joe J. y MARTENS, Scott N. Nickel hyperaccumulation defends *Streptanthus polygaloides* (Brassicaceae) against pathogens. *American Journal of Botany* [online]. marzo 1994. Vol. 81, no. 3, p. 294–300.
84. MCGRATH, Steve P., SIDOLI, C. M. D., BAKER, Alan J. M. y REEVES, Roger D. The Potential for the Use of Metal-Accumulating Plants for the in Situ Decontamination of Metal-Polluted Soils. In : *Integrated Soil and Sediment Research: A Basis for Proper Protection* [online]. Springer, Dordrecht, 1993. p. 673–676.

85. CHANEY, R L, ANGLE, J S, BAKER, A J M y LI, Y M. Method for phytomining of nickel, cobalt and other metals from soil [online]. 1999.
86. ERNST, W.H.O. Bioavailability of heavy metals and decontamination of soil by plants". *Applied Geochemistry* [online]. 1996. Vol. 11, p. 163–167.
87. REMON, E., BOUCHARDON, J. L., CORNIER, B., GUY, B., LECLERC, J. C. y FAURE, O. Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: Implications in risk assessment and site restoration. *Environmental Pollution* [online]. septiembre 2005. Vol. 137, no. 2, p. 316–323.
88. NORLAND, Michael R. y VEITH, David L. Revegetation of coarse taconite iron ore tailing using municipal solid waste compost. *Journal of Hazardous Materials* [online]. mayo 1995. Vol. 41, no. 2–3, p. 123–134.
89. LASAT, Mitch M., BAKER, Alan J.M. y KOCHIAN, Leon V. Altered Zn Compartmentation in the Root Symplasm and Stimulated Zn Absorption into the Leaf as Mechanisms Involved in Zn Hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens*. *Plant Physiology* [online]. noviembre 1998. Vol. 118, no. 3, p. 875–883.
90. LASAT, Mitch M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. *Journal of environmental quality* [online]. 2001. Vol. 31, no. 1, p. 109–20.
91. VANDENHOVE, Hildegard, BOUSHER, Andrew, JENSEN, Per Hedemann, JACKSON, Duncan, LAMBERS, Barbara y ZEEVAERT, Theo. Investigation of a possible basis for a common approach with regard to the restoration of areas affected by lasting radiation exposure as a result of past or old practice or work activity. [online]. 1999. P. 1–234.
92. MARSCHNER, Horst, TREEBY, Michael y RÖMHELD, Volker. Role of root-induced changes in the rhizosphere for iron acquisition in higher plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* [online]. 1 enero 1989. Vol. 152, no. 2, p. 197–204.
93. BRADSHAW, Anthony. The use of natural processes in reclamation - Advantages and difficulties. *Landscape and Urban Planning* [online]. octubre 2000. Vol. 51, no. 2–4, p. 89–100.

94. BAYDINA, N L. Inactivation of heavy metals by humus and zeolites in industrially contaminated soil. *Eurasian Soil Science* [online]. 1996. Vol. 28, no. 1, p. 96–105.
95. HERMS, U. y BRÜMMER, G. Einflußgrößen der Schwermetalllöslichkeit und -bindung in Böden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* [online]. 1 enero 1984. Vol. 147, no. 3, p. 400–424.
96. MIRSAL, Ibrahim A. *Soil Pollution: Origin, Monitoring & Remediation*. Springer, 2004. ISBN 3662054000.
97. MISRA, S.G. and D. Mani. Soil Pollution. *GAPH Publishing Corporation. New Delhi* [online]. 2011. P. 419–420.
98. SOIL SURVEY MANUAL. Soil Survey Manual (SSM) | NRCS Soils. *USDA* [online]. 2017.
99. LI, Yin-Ming, CHANEY, Rufus L., SCHNEITER, Albert A., MILLER, Jerry F., ELIAS, Elias M. y HAMMOND, James J. Screening for low grain cadmium phenotypes in sunflower, durum wheat and flax. *Euphytica* [online]. 1997. Vol. 94, no. 1, p. 23–30.
100. ESTÉVEZ, J, ANDRADE, M L, MARCET, P y MONTERO, M J. Fijacion y movilidad de cadmio y zinc en tres tipos de suelos acidos de Galicia, España. Retention and mobility of cadmium and zinc in three acid soils of Galicia, Spain.




# **ANEXOS**

## PLAN DE OBTENCIÓN DE DATOS

<b>OBJETIVOS Y PROCEDIMIENTOS GENERALES PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS</b>	
<p>El objetivo general es determinar la concentración de cadmio en hojas de <i>maíz (Zea mays)</i> y relacionarla con la disponibilidad en suelos de diferente pH del Valle del Mantaro.</p> <p><b>Procedimientos</b> Identificado los suelos del valle del Mantaro a través de una parcela agrícola de área variable en cada distrito, entre 0.8 a 1.5 ha, se realizó un muestreo de la capa superficial de los suelos en cada localidad, obteniendo un promedio de 22 muestras simples en cada lugar, para obtener una muestra compuesta de aproximadamente 10 kg de suelo. Para posteriormente analizar el pH del suelo, Cd en hojas, suelo y textura.</p>	
<b>PREGUNTAS BÁSICAS</b>	
<p><b>¿Cuáles son las fuentes?</b> Suelos Fertilizantes</p>	<p><b>¿Dónde se localiza?</b> Sincos Muquiyauyos San Lorenzo Quilcas Sicaya</p>
<p><b>¿Qué método se utilizará en la recolección de los datos?</b>  Juicio de expertos Medición a través de métodos establecidos: Método de muestreos de suelos (Minam) Preparación de muestra de suelo para análisis (Universidad Continental) Determinación de textura del suelo (Universidad Continental) Método del peachímetro Método concentración de Cd (EPA 3050-B/EPA3051)</p>	<p><b>¿En qué software estadístico se van a procesar los datos y de qué manera se van a analizar?</b>  Infostat 6 - se analizaron los datos a través del Análisis de Variancia y se aplicó la prueba de significación de Duncan (<math>p=0,05</math>) para comparar los tratamientos entre medias. Se hizo los análisis de regresión y correlación entre la concentración de cadmio en las hojas de <i>maíz (Zea mays)</i> y el contenido de cadmio total en el suelo.</p>
<p><b>Las variables a medir son:</b> A. EDAFICAS (Suelo) Caracterización del suelo (pH) Determinación de textura del suelo  B. PLANTACIONES Monitoreo del desarrollo fisiológico de la planta (hojas) Determinación de la extensión de las raíces</p> <p><b>Población:</b> La población está constituida por los suelos agrícolas del valle del Mantaro, que tienen diferente valor de pH.</p> <p><b>Muestra:</b> La muestra está constituida por cinco suelos del valle del Mantaro: Quilcas (moderadamente ácido), Sicaya (ligeramente ácido), San Lorenzo (neutro), Sincos (ligeramente alcalino) y Muquiyauyo (moderadamente alcalino).</p> <p><b>Definir el diseño de investigación:</b> El diseño de investigación es preexperimental.</p> <p><b>Recursos disponibles:</b> Se cuenta con los recursos económicos y con los recursos logísticos para los trabajos de campo.</p> <p><b>Tiempo:</b> Se utilizará 22 días para los trabajos de campo, una semana para los trabajos de laboratorio, 15 días para los trabajos en gabinete y 62 días para la parte experimental.</p>	

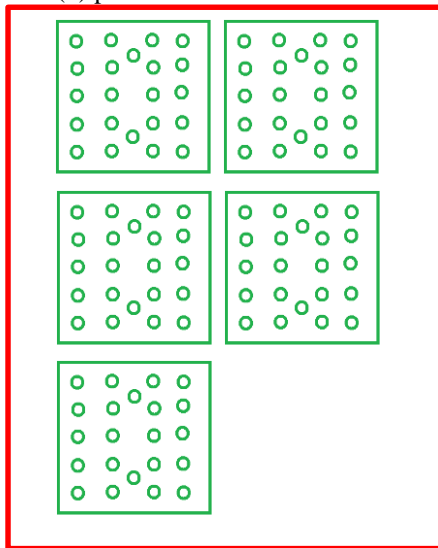
## DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES A DETALLE

<b>VARIABLE: SUELO (CARACTERIZACIÓN)</b>		
<b>ACTIVIDAD 1: CONSTRUCCIÓN DE CALICATAS E IDENTIFICACIÓN DE HORIZONTES</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Dentro de cada parcela de muestreo realizar el marcaje y registro mediante coordenadas geográficas los puntos superficiales de muestreo.</li> <li>Con el método de calicatas, para la construcción de las mismas, con el fin de describir en forma completa y detallada los horizontes representativos del suelo de nuestras muestras.</li> <li>La calicata se realizó en cada uno de los lugares a muestrear con el fin de diferenciar los tipos de horizontes pertenecientes a la parcela a muestrear.</li> </ul>		
	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; background-color: #e0ffe0; padding: 10px; margin-bottom: 10px;"> <p>Horizonte <b>A</b> se caracteriza por tener un color oscuro, debido a la gran cantidad de materia orgánica que contiene.</p> </div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; background-color: #e0ffe0; padding: 10px; margin-bottom: 10px;"> <p>Horizonte <b>B</b> es de color más claro, debido a que en este tramo del suelo precipitan las sales arrastradas del horizonte superior.</p> </div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; background-color: #e0ffe0; padding: 10px;"> <p>Horizonte <b>C</b> formado por fragmentos de la roca madre, más o menos grandes, rodeados de partículas finas que pueden provenir de los horizontes superiores.</p> </div>	
<b>INSTRUMENTOS</b>		
<b>De medición física:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>GPS</li> <li>Flexómetro</li> <li>Cinta edafológica</li> <li>Tensiómetro</li> </ul>	<b>De registro:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Libreta de apuntes</li> <li>Lapiceros</li> <li>Fichas de rotulado</li> <li>Fichas de registro</li> <li>Cámara fotográfica</li> </ul>	<b>Otros:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Pico</li> <li>Lampa</li> </ul>

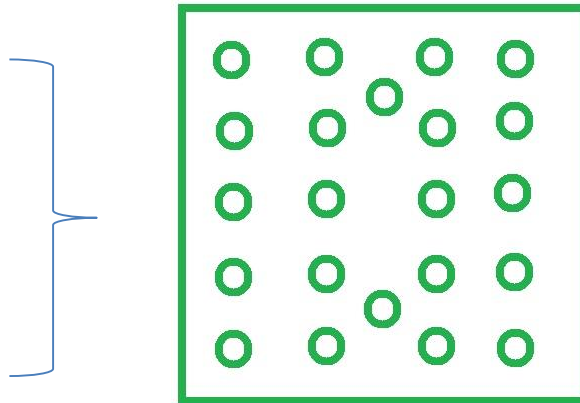
**VARIABLE: SUELO (CARACTERIZACIÓN)**

**ACTIVIDAD 2: DELIMITACIÓN DE LAS PARCELAS DE MUESTREO**

- Localización política y geográfica de la zona de estudio
- Localizar zonas de muestreo
- Delimitación de la población o área de estudio mediante el registro de coordenadas geográficas (latitud y longitud) UTM con el GPS
- Delimitación de las parcelas de muestreo 1.5 ha
- (5) parcelas distribuidas en 22 muestras compuestas.



Cada gráfico representa a una localidad donde se ha tomado una muestra compuesta de suelo (Sincos, Muquiyauyo, San Lorenzo, Quilcas y Sicaya)



Representa a una parcela muestreada con sus respectivos puntos de muestreo haciendo un total de 22 submuestras.

**INSTRUMENTOS**

**De medición física:**

- GPS
- Flexómetro

**De registro:**

- Libreta de apuntes
- Lapiceros
- Fichas de rotulado
- Fichas de registro
- Cámara fotográfica

**Otros:**

- Estacas

**VARIABLE: SUELO (CARACTERIZACIÓN)**

**ACTIVIDAD 3: Relación textural de los suelos**

- Para determinar la textura se empleó el método de hidrómetro se basó en las diferentes velocidades de sedimentación de las partículas primarias del suelo (arena, limo, arcilla), de acuerdo a la ley de Stoke (67).



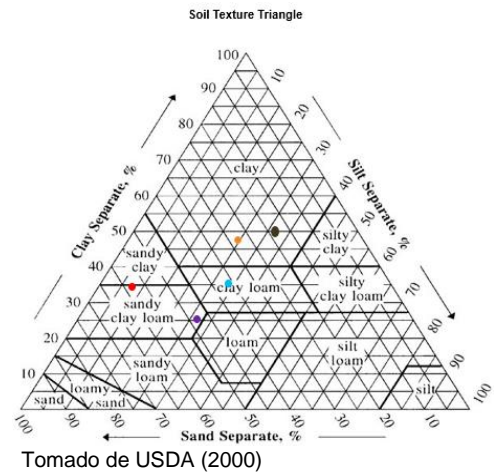
- Posteriormente teniendo los resultados del Higrómetro y Termómetro estos valores son reemplazados en la fórmula y ubicados en la tabla de la USDA de textura.

$$\text{Are. \%} = 100 - \left\{ \frac{(L1. + (1^\circ \text{tem} - 20) \times 0.2) \times 100}{50} \right\}$$

$$\text{Arc. \%} = \left\{ \frac{(L2. + (2^\circ \text{tem} - 20) \times 0.2) \times 100}{50} \right\}$$

$$\text{Limo \%} = 100 - (\% \text{ arcilla} + \% \text{ arena})$$

L1 = Primera lectura del hidrómetro  
L2 = Segunda lectura del hidrómetro



SSA. *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods.* J.H. Dane and G. Clarke Topp, Co-editors. Soil Science Society of America Book Series. Madison, Wisconsin, USA (2002)

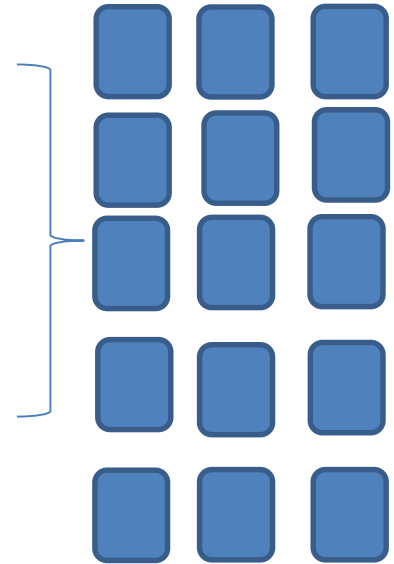
**INSTRUMENTOS**

<b>INSTRUMENTOS</b>		
<p><b>De medición física:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Higrómetro</li> <li>• Termómetro</li> </ul>	<p><b>De registro:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Libreta de apuntes</li> <li>• Lapiceros</li> <li>• Cámara fotográfica</li> </ul>	<p><b>Otros:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mezcladora</li> </ul>

**VARIABLE:** *Plantación*

**ACTIVIDAD 4:** Conducción del desarrollo fisiológico de la planta (hojas)

- El suelo muestreado de cada lugar fue secado al aire libre, después de lo cual se trituraron los terrones con una comba de madera, para su posterior tamizado.
- Se tamizó el total de la muestra de cada suelo, utilizando un tamiz de 2 mm de diámetro promedio de malla.
- Se pesó 2 kg de suelo y se colocó en bolsas plásticas negras.



Se condujo el experimento en un periodo promedio de 62 días, realizándose una cuidadosa observación del crecimiento de las plantas, realizando los riegos oportunos mediante el método de pesadas, hasta observar que el volumen de suelo era limitante para el normal crecimiento de las plantas.

**INSTRUMENTOS**

**De medición física:**

- Balanza

**De registro:**

- Libreta de apuntes
- Lapiceros
- Fichas de rotulado
- Fichas de registro
- Cámara fotográfica

**Otros:**

- Bolsas

**VARIABLE:** *Concentración de Cd en hojas de maíz*

**ACTIVIDAD 5:** Determinar la concentración de Cd en la hoja de maíz

- Finalizado el periodo experimental, el 15 de octubre de 2016, se procedió a medir la altura de planta de cada tratamiento.



- Posteriormente cortarla, colocándola en una bolsa de papel Kraft para llevarlo al laboratorio, secarlo en una estufa a 60°C para obtener el peso seco de la parte aérea de la planta.
- Finalmente se tomó una muestra del suelo de cada unidad experimental y se envió al laboratorio para el análisis de cadmio total.

#### INSTRUMENTOS

**De medición física:**

- Flexómetro

**De registro:**

- Libreta de apuntes
- Lapiceros
- Cámara fotográfica

# RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELO Y FOLIAR



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUAS Y PLANTAS (LASAP)



## ANÁLISIS DE SUELO

Solicitante : David Edu Cristóbal Elescano  
Distritos : Sicaya, Muquiyayuyo, Quilcas, San Lorenzo, Sincos  
Región : Junín  
Fecha : 09-09-2016

Parámetro	Muestra	Localidad				
		Sicaya	Muquiyayuyo	Quilcas	San Lorenzo	Sincos
pH	1	6.344	8.214	5.721	6.832	7.654

  
  
Andrés A. Arabaché Leguán  
INGENIERO AGRÓNOMO  
CIP 23497

Dirección: Carretera Central Huancayo-Jauja, km 34. Distrito El Mantaro.





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



## INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : DAVID EDU CRISTOBAL ESLESCANO  
PROCEDENCIA : JUNÍN/ HUANCAYO/ QUILCAS  
REFERENCIA : H.R. 55917  
BOLETA : 13557  
FECHA : 30/09/2016

Lab	Número Muestra	Cd ppm
	Claves	
3512		1.45



*Sady García Bendezú*  
Dr. Sady García Bendezú  
Jefe del Laboratorio



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



## INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : DAVID EDU CRISTOBAL ESLESCANO  
PROCEDENCIA : JUNÍN/ HUANCAYO/ SICAYA  
REFERENCIA : H.R. 55917  
BOLETA : 13557  
FECHA : 30/09/2016

Lab	Número Muestra	Cd ppm
	Claves	
3513		1.61



*Sady García Bendezu*  
Sady García Bendezu  
Jefe del Laboratorio



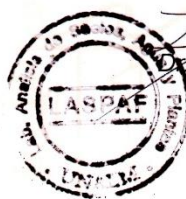
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
FACULTAD DE AGRONOMIA  
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



## INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : DAVID EDU CRISTOBAL ESLESCANO  
PROCEDENCIA : JUNÍN/ JAUJA/ SAN LORENZO  
REFERENCIA : H.R. 55917  
BOLETA : 13557  
FECHA : 30/09/2016

Lab	Número Muestra	Cd ppm
	Claves	
3510		1.22



*Sady García Bendezu*  
Sady García Bendezu  
Jefe del Laboratorio



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



## INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : DAVID EDU CRISTOBAL ESLESCANO  
PROCEDENCIA : JUNÍN/ JAUJA/ SINCOS  
REFERENCIA : H.R. 55917  
BOLETA : 13557  
FECHA : 30/09/2016

Lab	Número Muestra	Cd ppm
	Claves	
3509		7.96



*Sady García Bendezu*  
Dr. Sady García Bendezu  
Jefe del Laboratorio



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



## INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : DAVID EDU CRISTOBAL ESLESCANO  
PROCEDENCIA : JUNÍN/ JAUJA/ MUQUIYAYUO  
REFERENCIA : H.R. 55917  
BOLETA : 13557  
FECHA : 30/09/2016

Número Muestra		Cd ppm
Lab	Claves	
3511		6.88



*Sady García Bendezu*  
Sady García Bendezu  
Jefe del Laboratorio



## INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : DAVID EDU CRISTÓBAL ELESCANO  
PROCEDENCIA : JUNIN  
REFERENCIA : H.R. 56845  
BOLETA : 13790  
FECHA : 06/12/2016

Lab	Número Muestra	Cd ppm
	Claves	
4209	Junin, Huancayo, Quilcas-1-I	1.97
4210	Junin, Jauja, Sincos-1-II	2.08
4211	Junin, Jauja, San Lorenzo-1-III	2.24
4212	Junin, Jauja, Muquiyayuyo-2-I	2.49
4213	Junin, Huancayo, Sicaya-2-II	2.26
4214	Junin, Huancayo, Quilcas-2-III	2.13
4215	Junin, Huancayo, Quilcas-3-III	2.09
4216	Junin, Jauja, Sincos-3-III	2.10
4217	Junin, Jauja, San Lorenzo-3-III	1.97
4218	Junin, Jauja, Muquiyayuyo-4-I	8.12
4219	Junin, Huancayo, Sicaya-4-II	7.95
4220	Junin, Huancayo, Quilcas-4-III	8.36
4221	Junin, Huancayo, Quilcas-5-I	1.99
4222	Junin, Jauja, Sincos-5-II	1.81
4223	Junin, Jauja, San Lorenzo-5-III	1.29

  
Garcia Bendezy  
Jefe del Laboratorio  


## Escala de interpretación de análisis de suelos

**pH\***

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

\*(Soil Survey Division Staff. 1993. Soil Survey Manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18).

## INFORME DE ANÁLISIS ESPECIAL EN FOLIAR

SOLICITANTE : DAVID EDU CRISTÓBAL  
ELESCANO

PROCEDENCIA: JUNÍN

MUESTRA : HOJAS DE MAÍZ (ZEA MAYS)

REFERENCIA : H.R. 56846

BOLETA : 13790

FECHA : 05/12/2016

N. Lab.	CLAVE DE CAMPO	Cd ppm
6139	1 - I	1,68
6140	1 - II	0,50
6141	1 - III	0,18
6142	2 - I	1,40
6143	2 - II	0,50
6144	2 - III	0,78
6145	3 - I	0,93
6146	3 - II	0,91
6147	3 - III	1,45
6148	4 - I	1,60
6149	4 - II	0,83
6150	4 - III	0,68
6151	5 - I	0,85
6152	5 - II	1,30
6153	5 - III	1,23

*Dr. Sady García Bendezú*

*Jefe de Laboratorio*



## ANÁLISIS DE VARIANCIAS

**Cuadro 1. Análisis de varianza de la concentración de cadmio en las hojas de *maíz* (*Zea mays*)**

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fc	p-valor
Suelos	0.895	4	0.224	1.972	0.175
Error	1.134	10	0.113		
Total	2.028	14			

**Cuadro 2. Análisis de varianza del contenido de cadmio en 5 suelos de diferente pH, del valle del Mantaro**

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fc	p-valor
Suelos	90.104	4	22.526	486.594	< 0.0001
Error	0.463	10	0.046		
Total	90.567	14			

**Cuadro 3. Análisis de varianza de la tasa de transferencia de cadmio del suelo hacia las hojas de *maíz* (*Zea mays*)**

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fc	p-valor
Suelos	7 707,106	4	1 926.776	8.481	0.003
Error	2 271.852	10	227.185		
Total	9 978.958	14			

**Cuadro 4. Análisis de varianza de la materia seca de la parte aérea de *maíz* (*Zea mays*)**

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fc	p-valor
Suelos	31.497	4	7.874	1.643	0.239
Error	47.928	10	4.793		
Total	79.425	14			

**Cuadro 5. Análisis de varianza de la materia seca de la raíz de *maíz* (*Zea mays*)**

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fc	p-valor
Suelos	1.244	4	0.311	1.280	0.341
Error	2.431	10	0.243		
Total	3.675	14			

**Cuadro 6. Análisis de varianza de la altura de planta de *maíz* (*Zea mays*)**

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fc	p-valor
Suelos	71.163	4	17.791	2.391	0.128
Error	76.713	10	7.671		
Total	147.876	14			

**Cuadro 7. Análisis de varianza de la longitud de la raíz de *maíz* (*Zea mays*)**

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fc	p-valor
Suelos	43.114	4	10.778	0.655	0.636
Error	164.436	10	16.444		
Total	207.549	14			

## PANEL FOTOGRÁFICO



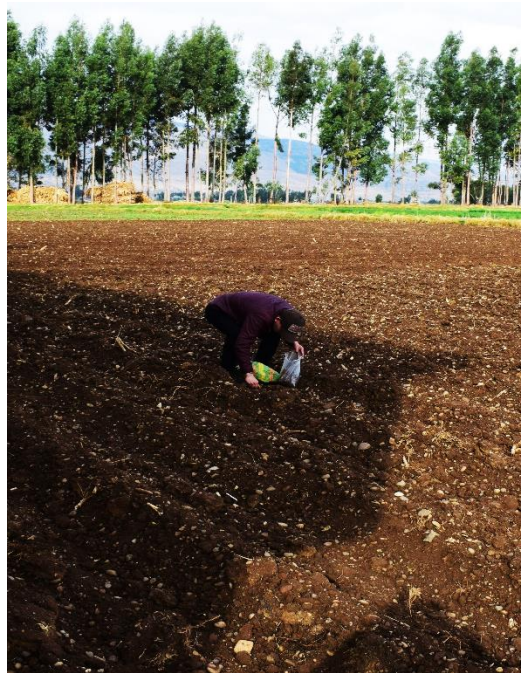
Fotografía 1: terreno muestreado Muquiyauyo



Fotografía 2: toma de muestra Muquiyauyo



Fotografía 3: terreno muestreado San Lorenzo



Fotografía 4: toma de muestra San Lorenzo



Fotografía 5: terreno muestreado Quilcas



Fotografía 6: toma de muestra Quilcas



Fotografía 7: terreno muestreado Sicaya



Fotografía 8: toma de muestra en la localidad de Sicaya



Fotografía 9: toma de muestra Sincos



Fotografía 10: toma de muestra Sincos



Fotografía 11: muestras de los suelos muestreados



Fotografía 12: preparación de muestra



Fotografía 13: tamizado de suelo



Fotografía 14: tamizado de muestras



Fotografía 15: preparado para la plantación



Fotografía 16: pesado de las muestras



Fotografía 17: análisis de textura



Fotografía 18: batido de la muestra (suelo)



Fotografía 19: toma de datos



Fotografía 20: inicio de la parte experimental



Fotografía 21: periodo terminado de la parte experimental



Fotografía 22: medición de la raíz



Fotografía 23: plantas cortadas



Fotografía 24: secado de la parte aérea



Fotografía 25: muestras para la determinación de cadmio total