

**UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS**

**“REDUCCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE CADMIO HACIA LA  
PLANTA UTILIZANDO SUSTANCIAS HÚMICAS EN SUELOS  
AGRÍCOLAS CONTAMINADOS”**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER:  
ALBERT EDINZON VITOR AGUILAR**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO AMBIENTAL**

**HUANCAYO-PERÚ**

**2018**

**“REDUCCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE CADMIO  
HACIA LA PLANTA UTILIZANDO SUSTANCIAS HÚMICAS  
EN SUELOS AGRÍCOLAS CONTAMINADOS”**

## **DEDICATORIA**

A mi padre, Claudio; quien estuvo motivándome a desarrollar una investigación que sirva de apoyo y beneficio a la sociedad.

A Epifania; mi madre, quien ha sido el eje de mi vida a lo largo de los años de mi bien y recordada juventud, inculcándome siempre valores alentándome en cada momento a pesar de todos los inconvenientes sucedidos, logrando de esta manera, hacer de mí un hombre perseverante y luchador.

Albert.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios en primer lugar por brindarme salud y Bienestar.

A mis padres Claudio y Epifania, por el apoyo incondicional que siempre me brindan.

A Sra. Marisol Alvarado Unsihuay Gerente de VALNI SAC por el apoyo Incondicional.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	viii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	xv
CAPÍTULO I	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Caracterización de la Realidad Problemática	1
1.2. Formulación del Problema	2
1.2.1. Problema General	2
1.2.2. Problemas Específicos	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo General	2
1.3.2. Objetivos Específicos	2
1.4. Justificación	3
1.5. Importancia	3
1.6. Limitaciones	3
CAPÍTULO II	4

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1. Marco Referencial	4
2.1.1. Antecedentes de la Investigación	4
2.1.2. Referencias Históricas	8
2.2. Marco Legal	9
2.2.1. Ley General del Ambiente N° 28611	9
2.2.2. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo	10
2.3. Marco Conceptual	10
2.4. Marco Teórico	11
2.4.1. SUELO	11
2.4.2. MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO	21
CAPÍTULO III	35
3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	35
3.1. Metodología	35
3.1.1. Método	35
3.1.1.1. Ubicación del lugar de muestreo del suelo agrícola	35
3.1.1.2. Lugar de ejecución del experimento.	36
3.1.1.3. Materiales y Equipos	36
3.1.2. Procedimiento para la ejecución del trabajo de Investigación	37
Fuentes de ácidos húmicos.	37
Dosificación de las sustancias húmicas de diferente origen.	38
Siembra de la planta	39
3.1.3. Tipo de la Investigación	39
3.1.4. Nivel de la Investigación	39

3.2.	Diseño de la Investigación.	39
3.3.	Hipótesis de la Investigación	40
3.3.1.	Hipótesis General	40
3.3.2.	Hipótesis Específicas.	40
3.4.	Variables	40
3.4.1.	Variable Independiente	40
3.4.2.	Variable Dependiente	41
3.5.	Cobertura del Estudio	41
3.5.1.	Universo	41
3.5.2.	Población	41
3.5.3.	Muestra	41
3.5.4.	Muestreo	41
3.6.	Técnicas e Instrumentos	41
3.6.1.	Técnicas de la Investigación.	41
3.6.2.	Instrumentos de la Investigación.	41
3.7.	Procesamiento estadístico de la información.	42
3.7.1.	Estadísticos.	42
3.7.2.	Representación.	42
3.7.3.	Técnica de comprobación de la hipótesis.	42
	CAPITULO IV	43
4.	ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
4.1.	Resultados obtenidos en la investigación	43
4.1.1.	Propiedades físicas del suelo.	43
4.2.	Discusión de resultados	46

4.2.1. Propiedades químicas del suelo.	47
CONCLUSIONES	58
RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXO	697



## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

MINAM	: Ministerio del Medio Ambiente.
DIGESA	: Dirección General de Salud.
T	: Temperatura
H	: Humedad
%	: porcentaje
AH	: ácidos húmicos
AF	: ácidos fúlvicos
°C	: grados centígrados
C/N	: relación carbono y nitrógeno.
INTEC	: Instituto Nacional Técnico
CE	: Conductividad Eléctrica
ES	: Elementos solubles
C.I.C.	: Capacidad de intercambio catiónico.
Km	: Kilómetros
m	: metros
cm	: centímetros
OMS	: Organización Mundial de la Salud
ECA	: Estándar de Calidad Ambiental.

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Triángulo de texturas utilizado por el USDA.....	14
Ilustración 2. Escala del pH del suelo .....	18
Ilustración 3: Modelo de estructura del ácido fúlvico .....	26
Ilustración 4: Modelo de estructura de un ácido húmico.....	27
Ilustración 5: Propiedades químicas de las sustancias húmicas .....	28
Ilustración 6: Grupos funcionales reactivos que pueden formar complejos con iones metálicos .....	32
Ilustración 7: Complejos de esfera interna .....	33
Ilustración 8: Complejos de esfera externa .....	33

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1: Variación de la textura del suelo antes y después del tratamiento .....	46
Gráfica 2: Comparación de la variación del pH en el suelo. ....	48
Gráfica 3: Variación de la C.E .....	50
Gráfica 4: Comparación de la CIC en el suelo .....	52
Gráfica 5: Comparación del % de cadmio retenido en el suelo. ....	55

## RESUMEN

El presente trabajo aborda la reducción de la disponibilidad de cadmio hacia la planta en los suelos agrícolas contaminados, utilizando sustancias húmicas de tres fuentes de materia orgánica. Para la investigación se planteó como objetivo general “Reducir la disponibilidad de cadmio hacia la planta en los suelos agrícolas contaminados a través sustancias húmicas de la materia orgánica.” y como objetivos específicos:

- Caracterizar el suelo mediante análisis físicos y químicos.
- Determinar la cantidad de cadmio absorbido por las sustancias húmicas del compost y vermicompost.
- Determinar que sustancia húmica es más efectiva en la adsorción de cadmio.

El experimento fue realizado a nivel laboratorio y se aplicó tres tipos de enmiendas orgánicas: E1 (compost comercial), E2 (estiércol vacuno), E3 (Humicel 25%) y a0 (testigo), donde se utilizó un suelo con una concentración de cadmio entre 5 y 6ppm, cada tratamiento tuvo 5.77 g de ácidos húmicos y posteriormente se sembró semillas de *Brassica Campestris*.

Los análisis físicos y químicos del suelo se realizaron desde el inicio y hasta el final del experimento, determinando la variación de concentración de cadmio, pH, conductividad eléctrica (CE) y la variación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC); la variación de estos parámetros fue observada y cuantificada durante un periodo de tiempo de tres meses, tiempo que demanda el crecimiento de la planta. Los resultados indican que con el Humicel 25%, incrementó la acidez en el suelo, sucediendo lo contrario con el estiércol vacuno donde incrementó la alcalinidad. En la conductividad eléctrica con el tratamiento con el Humicel 25% se incrementó

debido al exceso de iones libres como sodio, potasio, etc. La variación de la CIC fue favorable en los tratamientos de compost y estiércol vacuno, beneficiando a la retención de cadmio en el suelo. La disponibilidad del cadmio hacia la planta se determinó a través del porcentaje de retención de plomo en el suelo, teniendo una relación inversamente proporcional.

La sustancia húmica que se encuentran en el estiércol vacuno son las que reducen la disponibilidad del cadmio hacia la planta seguido por el compost; mientras que los tratamientos donde se incorporó el Humicel 25% y los testigos no hay ninguna variación.

## **ABSTRACT**

The present work addresses the reduction of the availability of cadmium to the plant in contaminated agricultural soils, using humic substances from three sources of organic matter. For the research, the general objective was "to reduce the availability of cadmium to the plant in agricultural soils contaminated by humic substances of organic matter." And as specific objectives: • Characterize the soil through physical and chemical analysis. • Determine the amount of cadmium absorbed by the humic substances of compost and vermicompost. • Determine which humic substance is most effective in the adsorption of cadmium. The experiment was carried out at the laboratory level and three types of organic amendments were applied: E1 (commercial compost), E2 (cow dung), E3 (Humicel 25%) and a0 (control), where a soil with a concentration of cadmium was used between 5 and 6ppm, each treatment had 5.77 g of humic acids and seeds of *Brassica Campestris* were later sown. The physical and chemical analyzes of the soil were carried out from the beginning and until the end of the experiment, determining the variation of cadmium concentration, pH, electrical conductivity (EC) and the variation of the cation exchange capacity (CIC); the variation of these parameters was observed and quantified during a period of time of three months, time that demands the growth of the plant. The results indicate that with Humicel 25%, acidity increased in the soil, the opposite happened with bovine manure where alkalinity increased. In the electrical conductivity with the Humicel treatment 25% was increased due to the excess of free ions such as sodium, potassium, etc. The variation of the CIC was favorable in the treatments of compost and cow dung, benefiting the retention of cadmium in the soil. The

availability of cadmium to the plant was determined through the percentage of lead retention in the soil, having an inversely proportional relationship. The humic substance found in cow manure are those that reduce the availability of cadmium to the plant followed by compost; while the treatments where Humicel 25% was incorporated and the controls there is no variation.

## INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del riego con aguas contaminadas con metales pesados y un manejo inadecuado del recurso suelo, se vienen produciendo cambios físicos, químicos y biológicos, causando alteraciones drásticas en la concentración de metales en el suelo y su disponibilidad hacia la planta.

Los metales pesados pueden permanecer en el suelo durante mucho tiempo, su persistencia, acumulación progresiva y/o su transferencia a otros sistemas supone una amenaza para la salud humana y los ecosistemas.

El cadmio como contaminante ambiental, normalmente se encuentra en forma elemental, no cumple ninguna función esencial en el cuerpo humano, sino que causa efectos negativos como óxidos, hidróxidos y complejos oxianiónicos metálicos que tienden a acumularse en la superficie del suelo quedando accesibles a las raíces de los cultivos. Las plantas cultivadas en suelos contaminados absorben en general más oligoelementos, y la concentración de éstos en los tejidos vegetales está a menudo directamente relacionada con su abundancia en los suelos, especialmente en la solución húmeda. Excesivas concentraciones de metales en el suelo podrían impactar la calidad de los alimentos, la seguridad de la producción de cultivos y la salud del medio ambiente, ya que estos se mueven a través de la cadena alimenticia vía consumo de plantas por animales y estos a su vez por humanos.

Por esta razón se investiga diversas formas para remediar el suelo que no sean costosas y sean efectivas; el uso de materiales de origen natural para retener los cationes de metales pesados como las sustancias húmicas que se encuentran en el compost, estiércol vacuno y soluciones comerciales como el Humicel 25% tienen la capacidad de retener cationes de metales pesados, evitando que estos se movilicen a otros sistemas.



# **CAPÍTULO I**

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Caracterización de la Realidad Problemática**

Los metales pesados pueden permanecer en el suelo durante mucho tiempo, porque no pueden ser degradados. Su persistencia, acumulación progresiva y/o su transferencia a otros sistemas supone una amenaza para la salud humana y la de los ecosistemas.

El riego con aguas contaminadas con metales pesados producto de la minería y actividades asociadas en zonas agrícolas en el Valle del Mantaro ocasiona la contaminación del suelo, por esta razón se investiga diversas formas para remediar el suelo que no sean costosas y sean efectivas; el uso de materiales de origen natural para retener los cationes de metales pesados como las sustancias húmicas que se encuentran en el compost, tienen la capacidad de retener cationes de metales pesados, evitando que estos se movilicen a otros sistemas.

## **1.2. Formulación del Problema**

### **1.2.1. Problema General**

¿En qué cantidad se reducirá la disponibilidad de cadmio en la asimilación de las plantas haciendo uso de las sustancias húmicas de la materia orgánica en suelos agrícolas contaminados?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del suelo?
- ¿Qué cantidad de cadmio es adsorbido por las sustancias húmicas del compost, vermicompost de estiércol vacuno y comerciales?
- ¿Qué sustancia húmica es más efectiva en la adsorción de cadmio?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Reducir la disponibilidad de cadmio hacia la planta en los suelos agrícolas contaminados a través sustancias húmicas de la materia orgánica.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar el suelo mediante análisis físicos y químicos.
- Determinar la cantidad de cadmio absorbido por las sustancias húmicas del compost y vermicompost.
- Determinar que sustancia húmica es más efectiva en la adsorción de cadmio.

#### **1.4. Justificación**

Este trabajo de investigación busca obtener alternativas de solución a la problemática de la contaminación de los suelos agrícolas con metales pesados como el cadmio, a través de la adsorción de las sustancias húmicas del compost, vermicompost de estiércol vacuno y comercial, esta técnica permitirá reducir la disponibilidad del cadmio a la planta.

La investigación beneficia directamente a los agricultores porque les permitiría tener tierras de cultivo que no estén contaminadas con metales pesados como el cadmio, así como mejorar la calidad de los suelos, ya que el compost, vermicompost de estiércol vacuno y las sustancias húmicas comerciales poseen otras propiedades que nutren el suelo para incrementar la productividad de este.

#### **1.5. Importancia**

La importancia de este trabajo radica en la retención del cadmio en el suelo para que no sean disponibles para la planta en los suelos agrícolas contaminados donde se busca remediar la contaminación causada por la actividad antropogénica a través de métodos ecológicos como es la adsorción a través de las sustancias húmicas aplicando el compost, vermicompost de estiércol vacuno y comercial, dependiendo de la eficiencia de estas en concentración y tiempo para mejorar la calidad del suelo, de los productos agrícolas causando un beneficio social, económico y ambiental.

#### **1.6. Limitaciones**

Una de las principales limitaciones que se tuvo en la realización de las pruebas es el control del pH, ya que durante el periodo de crecimiento de la planta el pH del suelo variaba constantemente, por esta razón solo se tomó en cuenta la medición al inicio y al final del pH.

## **CAPÍTULO II**

### **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### **2.1. Marco Referencial**

##### **2.1.1. Antecedentes de la Investigación**

Título: LA INTERACCIÓN DE ÁCIDOS HÚMICOS CON METALES PESADOS (Johnson, J D Wells, K M Spark, 1997).

Resumen: La solubilidad de los ácidos húmicos de carbón y la absorción de metales pesados Cu (II), Zn (II), Co (II), y Cd (II) en ausencia y presencia de los ácidos húmicos se determinaron en función del pH y la concentración de electrolito de fondo. La solubilidad de los ácidos húmicos en la concentración de electrolitos baja aumenta en un proceso de dos etapas con un aumento en el pH de cerca de 80% se disuelve en la región de pH 3 - 8,5, y el resto en la región de pH > 8,5. La absorción

de los metales se produce a un pH de valores significativamente más bajos que aquellos asociados con la formación de hidróxidos insolubles, con un máximo que ocurre en la región de pH 5.5-7.5, y consiste en el estado sólido fracción de los ácidos húmicos. En la mayor concentración de electrolitos, la solubilidad de los ácidos húmicos es de nuevo un proceso de dos pasos, pero el aumento de la solución de ácido se produce en un rango relativamente estrecho de pH (5-6). A pH alto, la presencia de los ácidos húmicos reduce significativamente la precipitación de los metales, tanto en la concentración de sal de alta y baja, probablemente debido a la formación de humatos solubles de metales de las especies. Hay evidencias que sugieren que los grandes grupos funcionales de los ácidos húmicos con la que los cationes metálicos interactuar es el grupo carboxilo.

Título: FITOEXTRACCIÓN EN SUELOS CONTAMINADOS CON CADMIO Y ZINC USANDO ESPECIES VEGETALES COMESTIBLES (Universidad Autónoma Metropolitana, Margarita Beltrán, 2001)

Resumen: En este trabajo se presenta un estudio de fitoextracción en suelos contaminados con cadmio y cadmio-zinc a través de especies vegetales comestibles como la lechuga (*Lactuca sativa*) en dos variedades, la de hoja rizada (*Lactuca sativa crispata*) y la romana (*Lactuca sativa longifolia*), el calabacín (*Cucurbita moschata*) y el girasol (*Helianthus annuus*). El objetivo fue evaluar la capacidad de asimilación y concentración de cadmio y zinc por las especies vegetales mencionadas como un proceso de restauración de suelos contaminados.

La lechuga fue seleccionada por su alta asimilación de cadmio, reportada con anterioridad en la literatura por lo que sirvió de control. El girasol por su empleo en campo para la extracción de radionúcleos y nitratos y la posibilidad consecuente de poder asimilar cadmio en él. El calabacín, por su origen mexicano, por su disponibilidad y su producción todo el año,

además no existe algún reporte de estudios de este tipo efectuados con esta especie vegetal.

Para cada especie se evaluó el crecimiento en condiciones de invernadero, con control de humedad del suelo, temperatura y humedad relativa. Se llevó a cabo una caracterización del suelo al inicio y final de la experimentación y se plantaron las especies en suelo sin contaminar ("testigo"), suelo con cadmio (150 mg Cd/kg de suelo seco) y suelo con cadmio+zinc (150 y 350 mg de metal/kg de suelo seco, respectivamente). Las concentraciones de Cd y Zn se definieron con base en los criterios interinos de restauración de suelos contaminados con inorgánicos tóxicos (metales pesados) y otros de la PROFEPA-SEMARNAP (2000), para uso industrial y agrícola.

Se encontró que la inhibición en el crecimiento vegetal fue más alta en el suelo contaminado con cadmio-zinc y en menos grado en el suelo contaminado con cadmio, en comparación con las especies vegetales que crecieron en los suelos "testigo". La especie más tolerante a la presencia de cadmio fue el calabacín (sin inhibición alguna), seguido por la lechuga en sus dos variedades (con hasta 29%) y la menos tolerante en las condiciones de experimentación fue el girasol (con 32%), para el caso de Cd+Zn fue la lechuga (var. crispa) (con 21%), seguida por el girasol (con 40%), la otra variedad de lechuga (con 42%), y al final el calabacín (con 73%).

Se evaluó la capacidad de asimilación y acumulación de cadmio en el tejido vegetal, en el suelo con Cd, donde se presentaron concentraciones de hasta 357 ppm de Cd (mg Cd/kg de tejido seco) en raíces, 212 ppm en tallos, 204 ppm en hojas, 18 ppm en flores y 12 ppm en frutos. La presencia de los dos metales contaminantes en el suelo (Cd+Zn) de manera simultánea, provoca una inhibición en el crecimiento vegetal, sin embargo, no afectó en la extracción y asimilación del cadmio por las

plantas, las cuales lograron incluso absorber más Cd con la presencia de Zn.

Se analizó el transporte de contaminantes, donde la lechuga romana y el girasol transportaron más cadmio a la parte alta de la planta (tallos y hojas), mientras la lechuga de hoja rizada y el calabacín lo acumularon en mayor proporción en la parte baja (raíces).

Las especies vegetales lograron reducir hasta un 50% de Cd en ambos sustratos contaminados. La especie más eficiente en el proceso de fitoextracción de Cd fue la lechuga, compitiendo con el calabacín y al final el girasol (en el suelo con Cd). En el suelo con Cd+Zn el menos eficiente fue calabacín.

Las especies estudiadas pueden participar en el proceso de fitoextracción en suelos contaminados con cadmio y zinc, por su tolerancia e hiperacumulación de estos metales en el tejido vegetal, por la alta generación de biomasa/tiempo y siempre y cuando se lleve a cabo una disposición final ambientalmente adecuada y que se prevenga su consumo.

Título: MATERIAL DE ORIGEN NATURAL QUE RETIENE CATIONES DE METALES PESADOS (Revista Iberoamericana de Polímeros, 2007)

Resumen: Las sustancias húmicas, considerados como polímeros naturales constituyen hasta el 90% de la materia orgánica presente en los suelos. Las técnicas y métodos para su obtención y extracción del medio natural son conocidas (Conte P, Spaccini R, Chiarella M, Piccolo A. 2003), constituyendo fuente de obtención para su aplicación fundamentalmente en la agricultura. Otros usos importantes se han encontrado en las sustancias húmicas, basados, por ejemplo, en su capacidad para formar complejos quelatos con los metales (Clemente R, Escolar A, Pilar Bernal M. 2005).

El objetivo de este trabajo consiste en la caracterización estructural básica y la evaluación preliminar de la retención de cationes de metales pesados de un material de origen natural.

En el proceso de extracción de Humus Líquido a partir de vermicompost de estiércol vacuno se produce un sólido residual, el cual se sometió a lavados en medio ligeramente ácido hasta pH cercano a la neutralidad, se secó en estufa (100oC), se homogenizó y tamizó, originando un sólido neutro que se denominó RPA.

El sólido RPA se caracterizó mediante espectroscopia FTIR, espectrometría de masas y análisis elemental. El sólido presentó grupos -OH, -COOH, -C=O, (CH<sub>2</sub>-CH<sub>3</sub>)<sub>n</sub>; iones fragmentos de baja m/z atribuibles a grupos -OH, -CH, -CH<sub>3</sub> y O, coincidiendo con la relación O/C: 2,9 y H/C: 2,5 obtenida en el análisis elemental.

Se ejecutaron experimentos de retención para los cationes Pb (II), Ni (II), Cu (II). Se realizaron dos tipos de experimentos, uno con fuerza iónica constante (0,05 M, NaCl) y otro en condiciones normales del RPA. En todos los casos la retención estuvo por encima del 80%.

### **2.1.2. Referencias Históricas**

El río Mantaro es el cuerpo receptor de los relaves de muchas mineras como Volcan, San Cristóbal, Huarón, Morococha, etc. Así como los pasivos ambientales de 67 centros mineros que han sido cerrados incluyendo el Centro Metalúrgico Doe Run, que tienen una emisión elevada de metales pesados como plomo, cadmio, cobre, arsénico y hierro, sobrepasando en un amplio margen los Estándares de Calidad Ambiental.

Hay dos canales de irrigación que utilizan las aguas del Río Mantaro para el riego de aproximadamente 11 000 hectáreas de la superficie agrícola del Valle del Mantaro, el canal Cimirm (de la margen izquierda del río



Mantaro) y el canal plan Meris-Orcotuna que se encuentra en la margen derecha del río Mantaro. (Araujo, 2003).

El Distrito de Orcotuna se encuentra en la margen derecha del Río Mantaro, donde el área que dispone para cultivo es de 1576 ha, siendo su principal actividad económica la agricultura y crianza de animales menores. Según la Dirección Regional de Agricultura – Junín los productos con mayor predominio son la papa con una producción de 6922.7 t, seguido por la alfalfa 6653.3 t, el maíz choclo 2653.10 t, entre otros que son consumidos por la población del Valle del Mantaro, por esta razón la contaminación del río Mantaro por efluentes mineros, se ha convertido en un problema ambiental y social, que llegó a tener una incidencia a nivel internacional, la Universidad San Luis de Missouri (Proyecto Mantaro Revive, 2007).

Los resultados del análisis inicial de suelos sobre la concentración de cadmio en el año 2007 en el distrito de Orcotuna es 13.2 ppm Cd sobrepasando en 9 veces respectivamente los Estándares de Calidad Ambiental para suelos agrícolas (ECA– C) que es de 1.4 ppm.

Estos resultados suponen una amenaza para la salud humana y los ecosistemas; debido a que los metales pesados pueden permanecer en el suelo durante mucho tiempo, porque no pueden ser degradados.

## **2.2. Marco Legal**

### **2.2.1. Ley General del Ambiente N° 28611**

#### **Artículo 1°:**

“Toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes”.

### **2.2.2. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo**

#### **Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM**

De superarse los ECA para Suelo, en aquellos parámetros asociados a las actividades productivas, extractivas y de servicios, las personas naturales y jurídicas a cargo de estas deben realizar acciones de evaluación y, de ser el caso, ejecutar acciones de remediación de sitios contaminados, con la finalidad de proteger la salud de las personas y el ambiente.

Lo indicado en el párrafo anterior no aplica cuando la superación de los ECA para Suelo sea inferior a los niveles de fondo, los cuales proporcionan información acerca de las concentraciones de origen natural de las sustancias químicas presentes en el suelo, que pueden incluir el aporte de fuentes antrópicas no relacionadas al sitio en evaluación.

### **2.3. Marco Conceptual**

#### **Absorción:**

Proceso en el cual se hace referencia a la atracción de una sustancia sólida sobre un fluido con el que está en contacto, para que las moléculas del fluido penetren en la sustancia.

#### **Adsorción:**

El proceso por el cual los iones, o las moléculas, son retenidos sobre la superficie de un sólido. El sólido recibe el nombre de adsorbente y la sustancia que es adsorbida el nombre de adsorbato.

#### **Exudados radiculares**

Es una secreción que realizan las células de las puntas de las raíces, como siempre se hace presente en estas se considera como parte importante del sistema radicular de las plantas.

**Grupo carboxilo:**

Los grupos carboxilo son ácidos débiles, disociándose parcialmente para liberar iones de hidrógeno. Se simboliza como COOH y tiene grupos carbonilo y carboxilo en el mismo átomo de carbono, dando como resultado nuevas propiedades

**Grupo hidroxilo**

El grupo hidroxilo (también llamado oxhidrilo) OH<sup>-</sup> es un grupo funcional compuesto de 1 átomo de oxígeno y 1 de hidrógeno, característico de los alcoholes.

**Ligando**

Es un anión o una sustancia neutra que se puede enlazar covalentemente con el elemento central o ion central

**Micorrizas**

Se conoce con el nombre de micorriza a la asociación mutualista establecida entre las raíces de la mayoría de las plantas y ciertos hongos del suelo. Se trata de una simbiosis prácticamente universal, no sólo porque casi todas las especies vegetales son susceptibles de ser micorrizadas sino también porque puede estar presente en la mayoría de los hábitats naturales.

**2.4. Marco Teórico****2.4.1. SUELO**

El suelo es la capa superficial de la tierra y constituye el medio en el cual crecen las plantas. Es capaz de aportar los nutrientes fundamentales para el crecimiento de los vegetales y almacenar agua de lluvias cediéndola a las plantas a medida que la necesitan.

También en el suelo las raíces encuentran el aire necesario para vivir. El suelo se extiende tanto en superficie como en profundidad; consta de varias capas llamadas horizontes, aproximadamente paralelas a la superficie. (INIA, 2015).

## **PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO**

Las propiedades físicas son las que pueden evaluarse por inspección visual o por el tacto. Pueden medirse contrastándolas con algún tipo de escala, tamaño, consistencia, intensidad, etc. Cada suelo presenta un conjunto peculiar, de propiedades físicas, que depende de la naturaleza de sus componentes, de las cantidades relativas de cada uno de ellos y de la manera que se hallan mutuamente acoplados. (Thompson, Troeh; 2002).

### **a) Textura**

La textura del suelo es una de las características físicas más importantes, pues a través de ella, se puede predecir el comportamiento físico del suelo, haciendo inferencias acerca del movimiento del agua en el perfil, la facilidad de manejo y la cantidad de nutrientes. La textura indica la proporción de partículas fundamentales en el suelo: arcilla, limo y arena, que se agrupan en suelos de textura fina, media y gruesa. Con la proporción relativa de estas fracciones minerales se puede obtener un gran número de combinaciones que dan origen a las clases texturales. Su fraccionamiento sigue una función logarítmica con límites entre 0.002 y 2.0 mm. La fracción arcillosa es menor a 0.002 mm, el limo entre 0.002 y 0.05 mm, y la arena entre 0.05 y 2.0 mm (Manual de procedimientos analíticos, 2010).

**Tabla 1: Intervalos de tamaños para textura usados por el USDA**

<b>Fracción</b>	<b>Apartado del suelo</b>	<b>Tamaño, mm</b>
<b>Arena</b>	Arena muy gruesa	2.0 – 1
	Arena gruesa	1.0 – 0.5
	Arena media	0.5 – 0.25
	Arena fina	0.25 – 0.10
	Arena muy fina	0.10 – 0.05
<b>Limo</b>	Limo	0.05 – 0.002
<b>Arcilla</b>	Arcilla	Menor de 0.002

Fuente: Departamento de Agricultura de EE. UU.

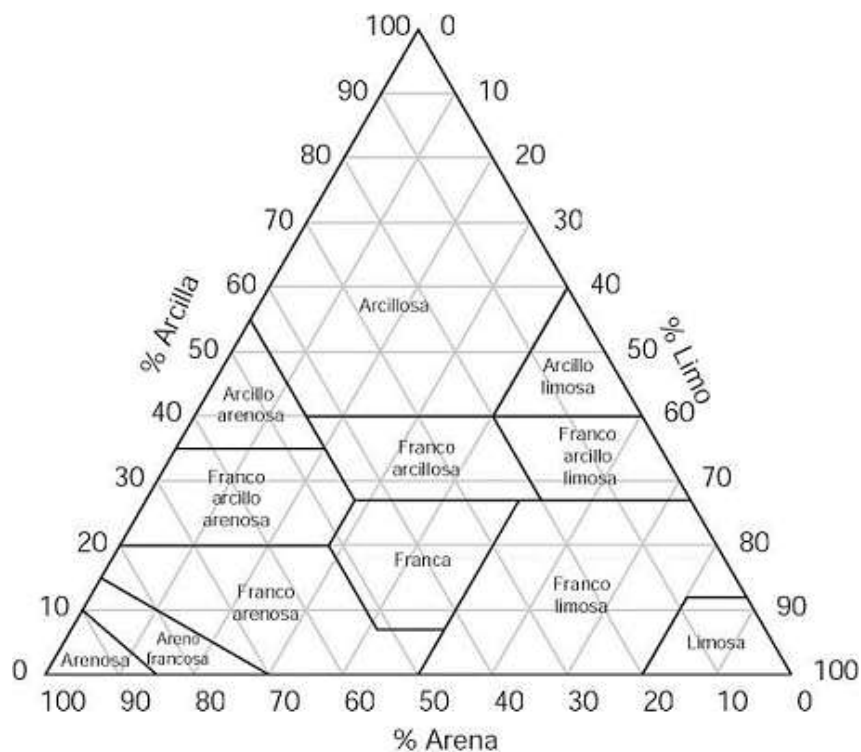
Las partículas con diámetro mayor que 2 mm se excluyen de las determinaciones de textura. Las piedras y gravas apenas contribuyen a las propiedades básicas del suelo, como la capacidad de retención del agua o de almacenar y suministrar nutrientes a las plantas (Hardstead et al, 2001).

### **Denominación de la textura del suelo**

Para nombrar las distintas texturas del suelo se usan las palabras arena, limo, arcilla y franco. El suelo franco contiene una mezcla de arena, limo y arcilla en tales proporciones que exhibe las propiedades de las tres fracciones de modo equilibrado (Thompson, Troeh; 2002).

Un triángulo de textura se puede utilizar para mostrar los dominios de las diferentes texturas del suelo, cada uno de sus lados a un eje graduado de 10 en 10, de 0 a 100, sobre el cual se transporta la cantidad del elemento que representa; en general un lado del triángulo corresponde a la arcilla, el otro al limo, el tercero a la arena (Hardstead et al, 2001).

**Ilustración 1: Triangulo de texturas utilizado por el USDA**



Fuente: Departamento de Agricultura de EE. UU.

### **PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO**

Las propiedades químicas de los suelos, están determinadas principalmente por la materia orgánica y las arcillas, por ser éstos las fuentes principales aportadoras de nutrientes. Son las que dependen de la parte más íntima del suelo como es su propia composición química. Las más importantes desde el punto de vista de la génesis del suelo son la alteración mineral y la formación de nuevas especies, así como lo relativo a la destrucción de la materia orgánica fresca y la formación de las sustancias húmicas. Además, se deben considerar compuestos que perteneciendo a la fase sólida del suelo, pueden pasar fácilmente a la fase líquida por ser extraordinariamente solubles, por lo que tienen una extraordinaria movilidad (Jordan A., 2006).

### **a) Capacidad de Intercambio Catiónico - CIC**

La carga negativa predominante de los coloides del suelo produce la retención de cationes y reduce su pérdida por lixiviación dejándoles disponibles para la vegetación sobre todo los iones sodio, potasio, calcio, y magnesio los cuales debido a su tamaño y baja carga precipitan con mucha dificultad.

Estos iones permanecen adsorbidos en las partículas coloidales, con lo que puede intercambiarse por otros iones de la disolución del suelo, por ello se denominan intercambiables. Se extraen normalmente con una disolución de acetato de amonio a  $\text{pH}=7$  como los valores de los cationes solubles son tan pequeños, muchas veces se equipará el valor del catión extraíble al del catión intercambiable ya que su resta apenas cambia el resultado.

Se pueden distinguir de los iones solubles en que mientras los intercambiables se extraen con una disolución de una sal neutra, estos se liberan al hacer pasar agua.

Cabe distinguir además los iones fijos, como los que están muy unidos a los silicatos, de tal manera que no se pueden recuperar por medio de procesos de intercambio como es el caso del potasio en las micas. (Calidad ambiental del suelo, 2014).

La capacidad de Intercambio catiónico (CIC) del suelo es la cantidad total de cargas negativas que están disponibles en la superficie de las partículas del suelo, principalmente en las arcillas y en la materia orgánica (MO). Estos parámetros son indicadores de fertilidad en los suelos, razón por la que es relevante determinar si se encuentran en cantidades y a la profundidad idónea para las plantas. Valores altos a muy altos de CIC y de MO indican que las condiciones del suelo van encaminados hacia una buena fertilidad.

La CIC controla la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Ca, K y Mg). También determina el papel del suelo como depurador natural al permitir la retención de elementos contaminantes presentes en el mismo. La CIC se expresa en miliequivalentes por 100 g de suelo (meq/100 g de suelo). Un miliequivalente es la cantidad de un elemento o compuesto que es capaz de combinarse y desplazar un miligramo (0.001 g) de hidrógeno.

**Tabla 2: Niveles de capacidad de intercambio catiónico (CIC)**

<b>NIVELES</b>	<b>meq/100 g de suelo</b>
Muy baja	< 5.0
Baja	5 – 10
Media	10 – 15
Alto	15 – 20
Muy alto	>20

Fuente: Universidad Agraria La Molina

## **b) pH DEL SUELO**

BEAR (1969), indica que conforme la suspensión del suelo se hace más diluido el valor del pH disminuye en especial en los suelos ácidos le llama a este efecto de la suspensión así mismo la concentración de sales aumenta a medida que el pH aumenta. El concepto de acidez del suelo ha sido evolucionado en el tiempo en un comienzo se considera que los procesos de hidrólisis de las sales del suelo eran los que daban lugar a la formación de ácidos, luego VEITCH (1949) mencionado por RUSSELL (1959) la relacionó con la fracción mineral del suelo al encontrar que los estratos del suelo contenidos en cloruro de sodio contienen fierro,



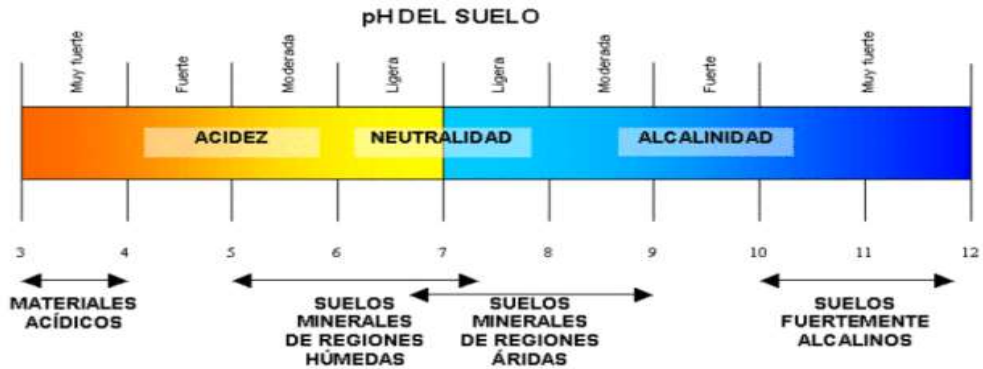
aluminio, magnesio, atribuyendo la acidez al reemplazo de dichos metales.

El pH de los suelos varía en función del clima. Suelos de regiones más lluviosas presentan valores de pH menores a los suelos de zonas de menor precipitación. Otra característica importante de comentar es el efecto del pH en la disponibilidad de nutrientes. En general a valores de pH neutros se presenta la mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas y organismos. A medida que un suelo se torna más ácido o más básico, muchos de los nutrientes se hacen menos disponibles.

JORDAN (2005), define el pH como una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos (incluidos microorganismos y plantas). La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos ( $H^+$ ) que se da en la interfase líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo.

El pH es una medida de acidez o alcalinidad del suelo que da una indicación de la actividad de los iones de hidrógeno ( $H^+$ ) e iones hidroxilo ( $OH^-$ ) en una solución acuosa. Ambos iones tienen una actividad química. Su actividad química es menor cuando la solución o el suelo está cerca de un pH neutro de 7.0. El pH que caracteriza el entorno químico de los suelos y se pueden utilizar una guía de aptitud de los suelos para pastos y diversas especies de cultivo. El pH del suelo es también un indicador de los procesos químicos que ocurren en el suelo, y es una guía para probables deficiencias y / o toxicidad (Slattery, 1999).

## Ilustración 2. Escala del pH del suelo



Fuente: Slattery, 1999

En los suelos naturales el valor del pH oscila entre 3 (suelos con sulfatos ácidos) y 12 (suelos alcalinos). Los suelos aptos para la agricultura tienen un pH comprendido entre 5.5 y 8.5.

**Tabla 3:** Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH

Categoría	Valor de pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	>8.5

Fuente: (NOM-021-REC-NAT-2000)

El pH del suelo afecta diversas propiedades físicas, químicas y biológicas. Desde el punto de vista físico afecta a la dispersión y/o floculación de coloides, a la estructura, la porosidad, la conductividad hidráulica y el régimen de humedad y temperatura del suelo.

En las propiedades químicas afecta a la meteorización química, movilidad de elementos tóxicos (como el Al, el Mn y metales pesados),

disponibilidad de nutrientes (como el Ca, Mg, Mb o P), descomposición de la materia orgánica y mineralización del nitrógeno, adsorción de aniones (como fosfatos, sulfatos, cloruros) y la alteración de los minerales de la arcilla.

Biológicamente influye en las relaciones bacterias / hongos, la población bacteriana, la humificación, fijación de nitrógeno y la movilidad y absorción de nutrientes.

#### **Grupo 1: Suelos con $\text{pH} \leq 4.2$ :**

Las fuentes responsables de acidez son:

- Formación de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  por oxidación de compuestos reducidos del azufre. Suelos sulfato ácidos.
- Electrolitos minerales de hidrólisis acida, portados al suelo por contaminantes químicos. La alta concentración de  $\text{H}^+$  causa destrucción de arcillas, liberando  $\text{Al}^{+3}$ .
- Grupos ácidos de la materia orgánica parcialmente descompuesta.

#### **Grupo 2: Suelos con $\text{pH}$ entre 4.2 y 5.2**

Las fuentes responsables de acidez son:

- Aluminio intercambiable. Cuando el  $\text{pH}$  del suelo llega a 5.2 se tiene la reacción de precipitación del  $\text{Al}(\text{OH})_3$ .
- Grupos ácidos de la materia orgánica, en un proceso mayor de humificación.
- Reacción de hidrolisis de  $\text{CO}_2$  y produce  $\text{HCO}_3^-$ .

#### **Grupo 3. Suelos con $\text{pH}$ entre 5.5 y 6.5 hasta 7.0**

Las fuentes responsables de acidez son:

- Grupos orgánicos ácidos de la materia orgánica con mayor grado de humificación.
- Protones de los grupos OH unidos a láminas de octaedros de Al, ubicados en las aristas de las arcillas.
- Reacción del  $\text{H}_2\text{CO}_3$
- Sales básicas de sulfato de aluminio.

#### **Grupo 4. Suelos con pH 6.5 a 7.0 y hasta 9.5**

Las fuentes responsables de acidez son:

- Grupos fenólicos de la materia orgánica humificada.
- Protones de los grupos OH unidos a láminas tetraedros de Al.
- Bicarbonato de calcio ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ).

#### **Grupo 5. Suelos con pH > 9.5**

Las fuentes responsables de acidez son:

- Grupos alcohólicos de materia orgánica humificada.
- Protones de grupos OH unidos a láminas de tetraedros de Si.
- Bicarbonatos de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ).
- Reacción de aluminón.

### **c) CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA**

La determinación de la conductividad eléctrica se utiliza normalmente para indicar la concentración total de los componentes ionizados en las soluciones (Soriano, 2001).

Las sales solubles en el suelo determinan la presencia en solución de una serie de combinaciones de los cationes: calcio, magnesio, sodio, potasio y de los aniones: carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, etc.

El agua que contiene sales disueltas del tipo que normalmente se encuentran en el suelo, conduce la corriente eléctrica, aproximadamente en proporción a la cantidad de sal disuelta. Por lo tanto, la medida de la conductividad nos dará la concentración total de los constituyentes ionizados.

La conductividad eléctrica se expresa en ohmios recíprocos por centímetro, o miliohmios por centímetro (mmho/cm). En general los valores de la CE 1.1 entre 0 y 0.8 dS/m son aceptables para el crecimiento de cultivos en general. La Tabla 1.4 muestra la clase de salinidad del suelo de acuerdo a la conductividad eléctrica.

**Tabla 4:** Conductividad eléctrica y clases de salinidad para una suspensión de suelo: agua 1:1

<b>Conductividad eléctrica (dS/m)</b>	<b>CLASE DE SALINIDAD</b>
0 – 0.98	No salino
0.98 – 1.71	Muy ligeramente salino
1.71 – 3.16	Ligeramente salino
3.16 – 6.07	Moderadamente salino
> 6.07	Fuertemente salino

Fuente: Adaptado de: Soil Survey Staff (1993), Janzen (1993) y Smith y Doran (1996)

El exceso de sales afecta el equilibrio del suelo y su fertilidad provocando:

- Destrucción del equilibrio iónico en la planta.
- Interferencia con el insumo de nutrientes
- Reducción de la asimilabilidad de agua por descenso del potencial osmótico.
- Sodio en exceso, frecuentemente expresado como porcentaje de sodio intercambiable PSI, puede deteriorar la estructura del suelo dispersando las arcillas del suelo (Luters, 2000).
- 

#### **2.4.2. MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO**

La totalidad de la materia orgánica del suelo se puede dividir en dos grupos (Stevenson 1982; Kononova 1966).

El primer grupo está formado por restos orgánicos, son aquellos materiales identificables como las partes total o parcialmente alteradas de la biomasa

(plantas, animales y microorganismos); representa los grupos de descomposición o los productos de la actividad vital (metabolismo y resíntesis) de la población viva. Lo característico de estos compuestos es que son identificables por la química orgánica (proteínas aminoácidos, hidratos de carbono simples y compuestos, resinas, grasas, ligninas y otros). Las sustancias de este grupo se consideran como fuentes de nutrientes para las plantas y los organismos del suelo. Igualmente, se les atribuyen actividades estimulantes e inhibidoras de crecimiento de las plantas como antibióticos y vitaminas. La producción de CO<sub>2</sub> del suelo, respiración, está asociada a su utilización como sustrato por los microorganismos.

Al segundo grupo componente de la materia orgánica del suelo se le llama sustancias húmicas. Su formación se realiza por procesos de complicadas transformaciones de los restos vegetales y animales del primer grupo. El termino es aplicado a compuestos que se forman en el suelo, por procesos no mediados por la vida (Kumada, 1987). Estos procesos son colectivamente llamados humificación y producen una mezcla que tiene una alta resistencia al posterior ataque microbiano y son completamente diferentes, en composición química, a cualquier sustancia vegetal o animal que les dio origen. Este componente, de color negro oscuro, de la fase solida del suelo juega un papel significativo en la formación y estabilización de los agregados, en el control de la acidez, en el reciclaje de elementos nutritivos, en la desintoxicación de compuestos peligrosos que llegan al suelo y en la fertilidad de éste.

#### **a) LA HUMIFICACIÓN**

La humificación de los restos orgánicos está caracterizada inicialmente por una fragmentación de los restos orgánicos y por la formación del humus, el cual muestra una disminución continua de la relación C/N a medida que avanza. (Kumada 1987).

El proceso de humificación no es completamente entendido, pero sucede por cuatro etapas mediadas enteramente por el clima, el relieve, la biota,

el material parental que incluyen los minerales primarios y a los restos vegetales interactuando en un tiempo determinado. Estas etapas son: (Zapata, 2002).

- 1) Descomposición de los constituyentes de la biomasa, incluyendo la lignina, en compuestos orgánicos simples.
- 2) El metabolismo microbial de estos compuestos simples.
- 3) El ciclo del carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno (H) y oxígeno (O), entre la materia orgánica y la biomasa microbial.
- 4) Un proceso de polimerización y resíntesis de las sustancias orgánicas presentes en el suelo que dan lugar a un producto resistente posterior al ataque microbial.

### **El Humus**

Es la materia orgánica del suelo, en un estado más o menos avanzado de estabilización que no se encuentra de una forma definida, sino en una serie de productos intermedios de transformación, hasta que parte de sus componentes llegan a mineralizarse bajo la acción del agua, oxígeno y principalmente de los microorganismos del suelo (Bellapart 1996, Guerrero 1996, Howard 1947, Bollo 1999).

El humus está formado por sustancias húmicas y no húmicas, aunque los términos de humus y sustancias húmicas con empleados como sinónimos por algunos autores (Stevenson 1994).

### **Sustancias Húmicas**

Las Sustancias Húmicas (SH) son los principales componentes de la materia orgánica natural (MON) que se encuentran en el suelo, el agua, en depósitos geológicos orgánicos, tales como sedimentos de lagos, turberas, carbón marrón y lutitas. (IHSS - Sociedad Internacional de Sustancias Húmicas).

Las SH son mezclas complejas y heterogéneas de materiales polidispersos formados por reacciones químicas y bioquímicas durante la descomposición y transformación de restos y plantas y microorganismos (proceso llamado humificación).

Son ubicuas en el medio natural, encontrándose tanto en medioambiente terrestres como acuáticos, tal es así que representan el 60 – 70% de la materia orgánica del suelo y el 30 – 50% de la materia orgánica del agua superficial. (Jones M; Bryan N, 1998).

**Características de las sustancias húmicas: (Porta, 2003).**

- Son polímeros no encuadrables en ningún tipo conocido; semejante a la lignina (Landeros 1993; Atlántica SA 2002).
- Polifuncionalidad debido al amplio intervalo de reactividad de los grupos funcionales.
- Relativamente oxidadas, lo que contribuye en su estabilidad frente a la biodegradación.
- Su estructura tridimensional no es rígida (geometría variable), debido a la asociación intermolecular y los cambios de pH, potencial redox, concentración de electrolitos y enlace de los grupos funcionales.
- Carga molecular dependiente del pH (carga variable). El punto de carga cero (PZC) es bajo, alrededor de 3, por lo que la carga será negativa a pH superiores de 3, aumentando la carga negativa con el pH, debido a la disociación de protones de los grupos funcionales carboxílico (-COOH) y fenólico (-OH) que actúan como ácidos débiles. Los Ácidos Fúlvicos (AF) tienen más grupos funcionales ácidos que los Ácidos Húmicos (AH), por lo que su acidez será mayor. (Stevenson, 1982)
- En estado natural los Ácidos Húmicos y Fúlvicos están íntimamente ligados a las arcillas (Guerrero 1996)

Estas características, lógicamente son transferidas al conjunto de la materia orgánica del suelo. Las sustancias húmicas no solo se



encuentran en la materia orgánica del suelo, sino que pueden estar presentes en sedimentos y aguas.

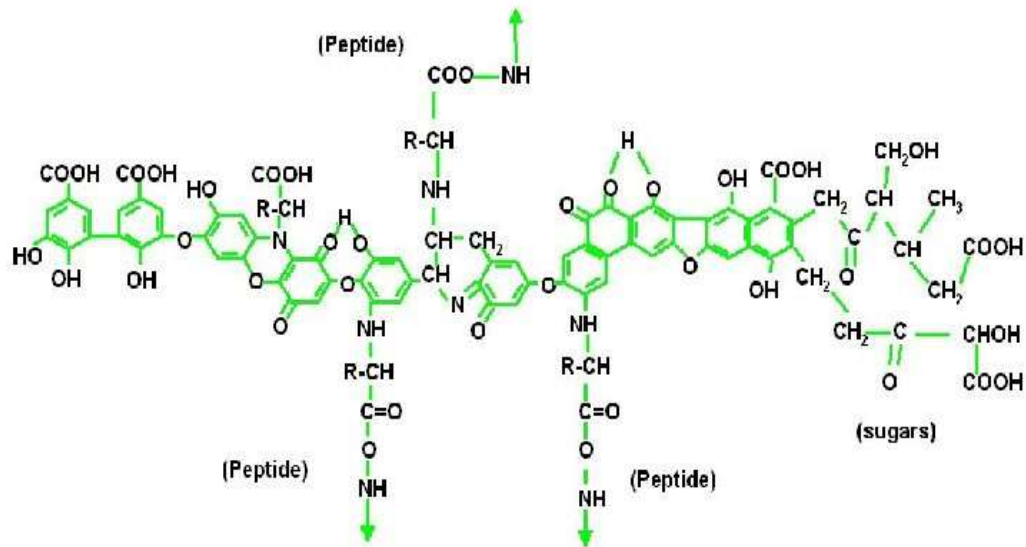
#### **a) Tipos de Sustancias Húmicas:**

##### **Ácidos Fúlvicos (AF)**

Los ácidos fúlvicos se distinguen de los ácidos húmicos por su coloración más clara, por el contenido relativamente bajo en carbono y por su buena solubilidad en agua, alcohol, álcalis y ácidos minerales (Soto G., 2003)

Los ácidos fúlvicos pertenecen al grupo de los ácidos hidrocarboxílicos y en la hidrólisis ácida forman sustancias reductoras y furfural. Tienen alta capacidad de cambio (hasta 700 meq por 100 g de sustancia). Actúan destructivamente sobre los minerales, tienen una estructura irregular con anillos aromáticos poco condensados con un tramo exterior débil y desorganizado de cadenas alifáticas lineales y probablemente diversos compuestos orgánicos. Están formados por polisacáridos, ácidos urónicos, aminoácidos, compuestos fenólicos, etc. Datos obtenidos de espectroscopia infrarroja, dan testimonio de la presencia de elementos de naturaleza aromática de los ácidos fúlvicos. Sobre la baja aromatización de los ácidos fúlvicos hablan los datos de la composición elemental en el cual el porcentaje de carbono es significativamente más bajo y el de hidrogeno supera al de los ácidos húmicos (Cristensen 1992). Los ácidos fúlvicos poseen en esencia unidades estructurales similares a la de los ácidos húmicos, se caracterizan por la presencia de una fracción nuclear poco pronunciada con predominio de cadenas laterales, por esto se les considera los representantes menos maduros del grupo de las sustancias húmicas.

**Ilustración 3:** Modelo de estructura del ácido fúlvico



Fuente: Stevenson – Buffle - Urbina (1994).

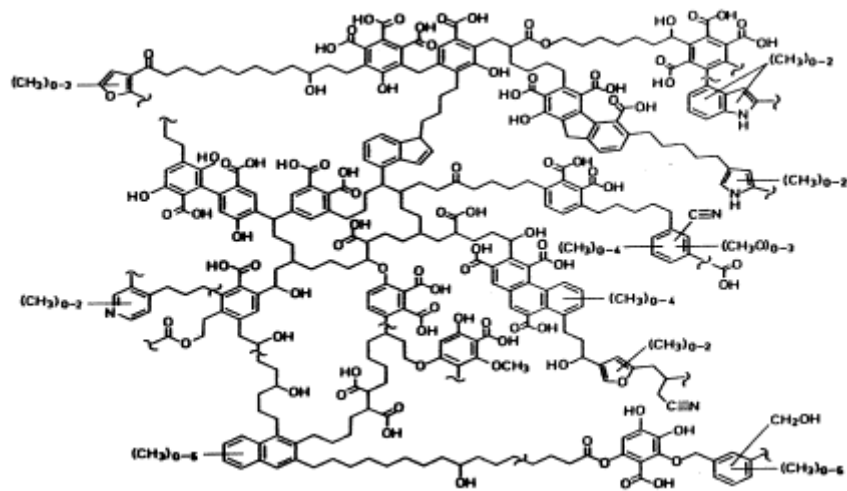
### Ácidos Húmicos (AH)

Es la fracción más importante del humus. La forma y composición de los ácidos húmicos tienen bastante que ver con la de las huminas, de modo que parecen tener un núcleo formado por compuestos aromáticos cíclicos distribuidos en capas, a partir de los cuales se ramifican cadenas alifáticas y diversos compuestos orgánicos (glúcidos, proteínas, polipéptidos, ácidos urónicos, etc).

Los ácidos húmicos estarían constituidos por moléculas cíclicas muy estables (anillos fenólicos) que actúan como soporte. Estos resultan derivados de la descomposición de macromoléculas lineales como hemicelulosas, celulosa y almidones, como de macromoléculas cíclicas como la lignina, siendo esta última la vía más importante (Greenland D., 1964).

Los ácidos húmicos están englobados en las materias que se extraen del suelo por distintos disolventes (NaOH, KOH, NH<sub>4</sub>OH, Na<sub>2</sub>HCO<sub>3</sub>, Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, NaF, oxalato sódico y otros), y que al acidificarse se precipitan de las soluciones obtenidas en forma de un gel oscuro. Los grupos característicos de los ácidos húmicos son los carboxilos e hidroxilos fenólicos.

**Ilustración 4:** Modelo de estructura de un ácido húmico

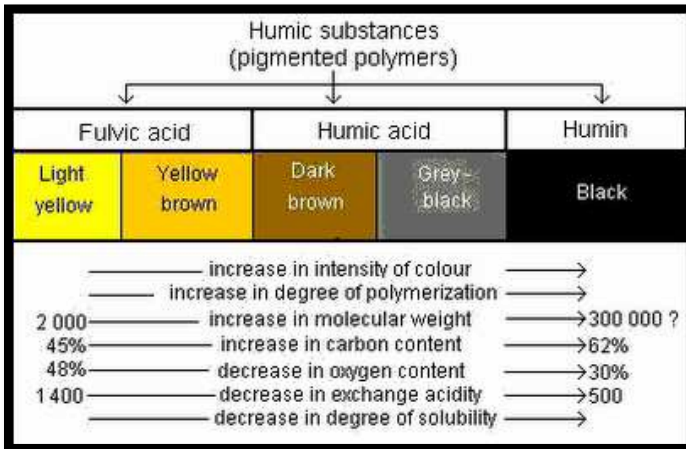


Fuente: H.R. Schulten y M. Schnitzer (1993)

### **Huminas:**

Constituyen la parte no soluble y por lo tanto no extraíble de las sustancias húmicas (Bollo 1999, Rice 2001, Hayes y Clapp 2001). La humina es la fracción más estable y por lo tanto más resistente al ataque microbiano lo que hace muy lento su proceso de mineralización. Esta es enriquecida con sustancias melaninas y parafinas en comparación a los ácidos fúlvicos y húmicos.

**Ilustración 5:** Propiedades químicas de las sustancias húmicas



Fuente: Stevenson 1982

**b) Composición de las sustancias húmicas:**

La composición de las sustancias húmicas varía dependiendo del origen, método de extracción y otros parámetros. En la Tabla 2.1 se observa que los ácidos fúlvicos presentan mayor contenido de oxígeno y menor contenido de carbono. De esta manera las relaciones O/C para los ácidos húmicos presentan un valor aproximado a 0.5, mientras que para los ácidos fúlvicos presentan un valor de 0.7 (Steelink, 1985).

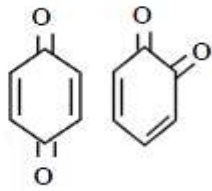
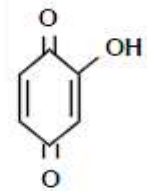
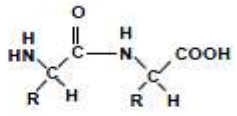
**Tabla 5:** Intervalos usuales para la composición elemental de las sustancias húmicas

Elemento	Ácidos Húmicos (%)	Ácidos Fúlvicos (%)
Carbono	53.8 - 58.7	40.7 - 50.6
Oxígeno	32.8 - 38.3	39.7 - 49.8
Hidrógeno	3.2 - 6.2	3.8 - 7.0
Nitrógeno	0.8 - 4.3	0.9 - 3.3
Azufre	0.1 - 1.5	0.1 - 3.6

Fuente: Steelink, 1995

La mayor parte de los grupos funcionales (Tabla 5) que se encuentran en las sustancias húmicas son de tipo oxigenado: carboxilos, alcoholes, hidroxilos fenólicos y carbonilos. Además, la presencia de grupos nitrogenados está ampliamente demostrada (Ramos R., 2000) Aunque también podemos encontrar éteres, hidroxiquinonas, lactonas... (Stevenson, 1994).

**Tabla 6:** Grupos funcionales presentes en las Sustancias Húmicas

Amino	$-\text{NH}_2$	Anhidrido	$\text{R-CO-O-CO-R}'$
Amina	$\text{R-CH}_2\text{-NH}_2$	Imina	$\text{R-CH=NH}$
Amida	$\text{R-CO-NH}_2$	Imino	$=\text{NH}$
Alcohol	$\text{R-CH}_2\text{-OH}$	Eter	$\text{R-CH}_2\text{-O-CH}_2\text{-R}'$
Aldehído	$\text{R-CHO}$	Ester	$\text{R-COOR}'$
Carboxilo	$\text{R-COOH}$		
		Quinona	
Carboxilato	$\text{R-COO}^-$		
Enol	$\text{R-CH=CH-OH}$		
Cetona	$\text{R-CO-R}'$		
		Hidroxiquininona	
Ceto-ácido	$\text{R-CO-COOH}$		
Carbonilo insaturado	$-\text{CH=CH-CHO}$		
		Péptido	

Fuente: Stevenson, 1994

Los ácidos fúlvicos contienen un mayor número de grupos funcionales de carácter ácido que los ácidos húmicos (Stevenson, 1994); particularmente carboxilos y fenoles. Además, en los ácidos húmicos la mayor parte del oxígeno se encuentra formando parte del núcleo o estructura central, en uniones éter o éster, mientras que para los ácidos fúlvicos esta como COOH, OH o C=O. Aunque estos datos muestran cierta variabilidad (Tabla 6), si se puede decir que los ácidos húmicos tienen menor acidez total que los húmicos, debido a la poca presencia de grupos carboxilo e hidroxilo.

**Tabla 7:** Distribución de los grupos funcionales oxigenados en sustancias húmicas (meq/100g).

	<b>Ácidos húmicos</b>	<b>Ácido fúlvicos</b>
<b>Acidez total</b>	560 - 890	640 - 1420
<b>COOH</b>	150 - 570	520 - 1120
<b>OH <u>ácidos</u></b>	210 - 570	30 - 570
<b>OH <u>alcohólicos y débilmente ácidos</u></b>	20 - 490	260 - 950
<b>C=O <u>cetónicos y de quinonas</u></b>	20 - 140	120 - 420
<b>OCH<sub>3</sub></b>	30 -80	30- 120

Fuente: Stevenson 1994

### **c) Interacciones de los componentes orgánicos e inorgánicos:**

#### **Componentes organominerales:**

Las interacciones entre las sustancias húmicas (C orgánico disuelto, COD) e iones metálicos dan lugar a la formación de complejos de diferente estabilidad que son extremadamente importantes ya que afectan a:

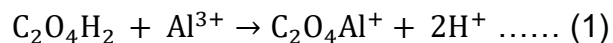
- La retención y la movilidad de los metales en suelos y aguas, con incidencia de los procesos edafogénicos y de contaminación.

- Estructuración del suelo.
- Nutrición de las plantas, al aumentar la movilidad y disponibilidad de determinados nutrientes, con posibilidad de una liberación progresiva.

En un complejo metal deja tener el comportamiento de tendría si estuviese libre y adquiere el complejo resultante. De este modo, las sustancias pueden servir de transportadoras de metales. Se han establecido dos ámbitos distintos: la materia orgánica viva (fracción biótica del suelo) y la materia orgánica coloidal no viviente (fracción abiótica). Interesa centrarse aquí en las interacciones pasivas de la fracción abiótica, por las que se contemplan las sustancias húmicas.

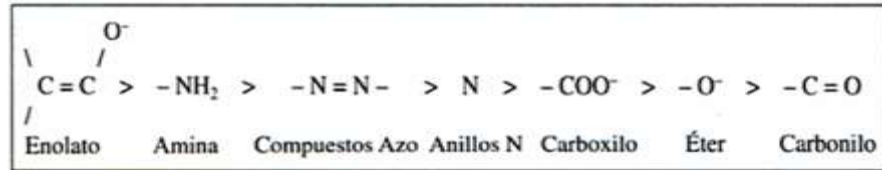
Las interacciones pueden tener lugar:

- En una primera etapa, por mezcla mecánica, debido a la bioturbación provocada por la fauna del suelo, posteriormente se entremezclan los micelios de hongos con las partículas de arena, limo y arcilla y por medio de las células microbianas o material capsular.
- El contacto entre los constituyentes minerales y componentes orgánicos, favorece que tendrán lugares reacciones que pueden ser: de intercambio iónico, de adsorción de superficie o quelación.
- La expresión “complejo orgánico - metálico” describe resultado de una reacción entre un anión complexante orgánico (ligando) y un elemento metálico. Como ejemplo podemos indicar el caso del ácido oxálico frente al ion aluminio.



Los grupos funcionales reactivos pueden formar complejos, presentando distinta afinidad frente a los iones metálicos (Chaberek y Martell, 1959).

**Ilustración 6:** Grupos funcionales reactivos que pueden formar complejos con iones metálicos



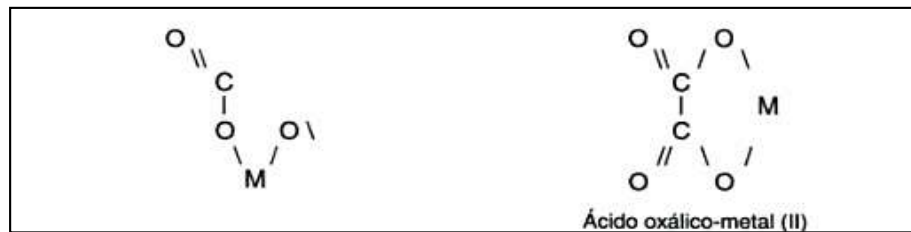
FFuente: Sparks, 1998

Las posiciones complexantes más importantes son los grupos carboxilo y OH- fenólico (Sparks, 1998). El tipo de interacción entre iones metálicos y ligando orgánico puede preverse a partir de las propiedades de hidrólisis de los elementos y “fuerzas” del metal y de los átomos donantes de electrones de las posiciones complexantes (Buffle y Stumm, 1994). Se puede determinar a partir de los valores  $Z^2/r$  ( $Z$ =carga,  $r$ = radio del catión). Los factores que controlan la unión son: la fuerza iónica, el pH, el tipo de arcilla, el tipo de grupo funcional y los cationes en concurrencia (Evangelou, 1999). La reacción adsorción ión metálico – sustancia húmica puede dar lugar a:

**Complejos de esfera interna**, en los que el ligando tiene dos átomos capaces de formar un anillo con un catión no hidratado, dando lugar a uniones fuertes. Si dos o más grupos funcionales de un mismo ligando están coordinados a un catión metálico en un complejo, éste recibe el nombre de quelato (gr. garra).



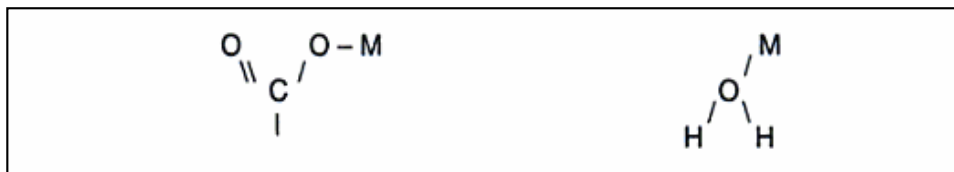
### Ilustración 7: Complejos de esfera interna



Fuente: Sposito, 1989

**Complejos de esfera externa** en ellos una o más moléculas de agua se interponen entre el grupo central (ligando) y el catión metálico. La unión es de tipo electrostático, débil y permite un intercambio rápido del catión (Sposito, 1989)

### Ilustración 8: Complejos de esfera externa



Fuente: Sposito, 1989

La afinidad del ion metálico por el ligando se puede evaluar a partir del valor de la constante de estabilidad de los complejos sustancia húmica – metal. Se ha puesto de manifiesto que cuanto mayor es el grado de humificación de una materia orgánica, mayor será potencial para formar complejos con los metales.

Los complejos organominerales del suelo se pueden agrupar en:

- Muy estables.
- Insolubles.
- Tamaño
- Tipo de uniones.
  - Minerales de arcilla con carga negativa/ grupos funcionales de carácter catiónico (aminas, aminoazucars, aminoácidos).

- Minerales de arcilla con carga positiva/ grupos funcionales con carga negativa (carboxílico y fenólico de los ácidos húmicos, ácidos nucleicos y aminoácidos).
- Minerales de arcilla con carga negativa/ grupos funcionales con carga negativa (carboxílico y fenólico de los ácidos húmicos). Se requiere de un catión polivalente que actuara como puente.

## **CAPÍTULO III**

### **3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Metodología**

##### **3.1.1. Método**

###### **3.1.1.1. Ubicación del lugar de muestreo del suelo agrícola**

El lugar de muestreo del suelo agrícola, se ubicó en el departamento de Junín, provincia de Concepción, distrito de Orcotuna; cuyas coordenadas geográficas son:

Latitud : 11°57'48.11" S  
Longitud : 78°17'52.90" O  
Altitud : 3238 msnm

### **3.1.1.2. Lugar de ejecución del experimento.**

La ejecución del experimento se realizó en el campo experimental de la Universidad Alas Peruanas, distrito de Pilcomayo, provincia de Huancayo, departamento de Junín; cuyas coordenadas geográficas son:

Latitud : 12°03'20.73" S  
Longitud : 75°15'38.74" O  
Altitud : 3218 msnm

### **3.1.1.3. Materiales y Equipos**

a) Equipos:

- Medidor de pH
- Medidor de conductividad
- Equipo medidor de textura
- Equipo de medición de CIC - Equipo Kjeldahl.

b) Materiales

- Papel filtro lento
- Balanza analítica
- Plancha para atacar las muestras
- Tubos de centrifuga de 200 ml
- Baño de agua
- pH-metro
- Agitador de vaivén
- Centrifuga
- Estufa de aire forzado o normal
- Pipetas volumétricas (1, 2, 3, 5 ml).

- Balanza analítica.
- Vasos de precipitación (150 ml).
- Balones de destilación (300 ml.)
- Pipeta dispensadora volumen fijo "DISPEN-FIX".
- Bureta con dosificador acoplado (50 ml).
- Frasco para dosificadores.
- Agitador magnético.
- Magneto.
- Matraz (250 m).
- Varilla magnética.
- Papeles filtro.
- Embudos.

c) Reactivos

- Ácido nítrico Q.P.
- Ácido Perclórico Q.P.
- Solución de ataque nítrico / perclórico, relación 5/1
- Solución de acetato de amonio 1.0N
- Alcohol etílico
- Solución de cloruro de potasio al 1N
- Hidróxido de sodio al 10N
- Solución de Ácido sulfúrico al 0.02N.
- Cloruro de Lantano 1%.

### 3.1.2. Procedimiento para la ejecución del trabajo de Investigación

#### Fuentes de ácidos húmicos.

Se utilizó tres fuentes de ácidos húmicos: procedentes del compost comercial, del estiércol vacuno y Humicel 25%.

En la siguiente tabla se indica el porcentaje de sustancias húmicas que se encuentran en las tres fuentes diferentes utilizadas en el experimento:

**Tabla 8:** Porcentaje de sustancias húmicas en las tres fuentes de origen.

<b>Fuentes de origen</b>	<b>Ácidos Húmicos</b>	<b>Ácidos Fúlvicos</b>	<b>Huminas</b>
Compost	3.46 %	2.11 %	34.68 %
Estiércol Vacuno	4.88 %	0.86%	12.22 %
Humicel 25%	17.00 %	8.00%	-

Fuente: Elaboración propia

#### **Dosificación de las sustancias húmicas de diferente origen.**

Para realizar la dosificación se tuvo en cuenta tener la misma cantidad de ácidos húmicos en cada tratamiento.

En el caso del compost, para un buen crecimiento de la planta se agregó la tercera parte del contenido total de suelo, que es de 167 gramos, como observamos en la tabla 8 el porcentaje de ácidos húmicos es de 3.46 g/100g de compost, entonces para 167 g de compost tendremos 5.77g de ácidos húmicos.

En el caso del estiércol vacuno, como se observa en la tabla 8; la cantidad de ácidos húmicos es de 4.88 g/100 g de estiércol vacuno, para llegar a tener 5.77 g de ácidos húmicos hemos agregado 118.2 g de estiércol vacuno.

En el caso de la sustancia húmica comercial como se encuentra en estado líquido, se tuvo en cuenta la densidad del producto que es de 1g/ml; como observamos en la tabla 8 tiene 17g en 100 ml; para llegar a 8.11g se agregó 2.1 ml del producto.

### Siembra de la planta

En cada una de las 8 macetas empleadas se agregaron 500 g de suelo. En la realización del experimento se utilizó las semillas de la *Brassica Campestris* que fueron compradas en un establecimiento comercial. Luego de 3 meses, se separó la planta y la raíz del suelo y se prosiguió con la realización del trabajo de investigación.

#### 3.1.3. Tipo de la Investigación

El tipo de investigación utilizado es experimental y aplicada.

#### 3.1.4. Nivel de la Investigación

El nivel es correlacional y explicativo

### 3.2. Diseño de la Investigación.

Para la distribución de los tratamientos se empleó el diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial de 4 x 1 y 2 repeticiones por tratamiento.

**Tabla 9:** Diseño experimental DCA

S <sub>1</sub>							
E <sub>1</sub>		E <sub>2</sub>		E <sub>3</sub>		t <sub>1</sub>	
r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>

Dónde:

S<sub>1</sub> : Suelo contaminado

E<sub>1</sub> : Compost comercial.

E<sub>2</sub> : Estiércol vacuno

E3 : Humicel 25%  
t1 : testigo  
r1 : primera repetición.  
r2 : segunda repetición.

### **3.3. Hipótesis de la Investigación**

¿En qué cantidad se reducirá la disponibilidad de cadmio en la asimilación de las plantas haciendo uso de las sustancias húmicas de la materia orgánica en suelos agrícolas contaminados?

#### **3.3.1. Hipótesis General**

Las sustancias húmicas de la materia orgánica reducen la disponibilidad del cadmio del suelo hacia la planta

#### **3.3.2. Hipótesis Específicas.**

- Es factible determinar las características fisicoquímicas del suelo.
- Es factible determinar la concentración de cadmio adsorbido por las sustancias húmicas del compost, vermicompost del estiércol vacuno y comercial.
- Es factible determinar la sustancia húmica más efectiva en la adsorción de cadmio.

### **3.4. Variables**

#### **3.4.1. Variable Independiente**



- ✓ Sustancias Húmicas (compost, vermicompost y comercial).
- ✓ Concentración de cadmio en el suelo

### **3.4.2. Variable Dependiente**

- ✓ Cantidad de cadmio adsorbido por las sustancias húmicas.

## **3.5. Cobertura del Estudio**

### **3.5.1. Universo**

Suelos contaminados con metales pesados.

### **3.5.2. Población**

Suelos agrícolas contaminados con metales pesados.

### **3.5.3. Muestra**

Kilogramos de suelos agrícolas contaminados con metales pesados del distrito de Orcotuna seleccionados aleatoriamente.

### **3.5.4. Muestreo**

El muestreo realizado fue aleatorio.

## **3.6. Técnicas e Instrumentos**

### **3.6.1. Técnicas de la Investigación.**

Las técnicas utilizadas en la investigación se basaron en los trabajos realizados en papers, monitoreo, análisis de datos y observación de campo.

### **3.6.2. Instrumentos de la Investigación.**

Los instrumentos de investigación fueron los reportes de los procesos experimentados por el laboratorio correspondiente, los resúmenes de los trabajos de investigación, los reportes de campo.

### **3.7. Procesamiento estadístico de la información.**

#### **3.7.1. Estadísticos.**

Se utilizó un software estadístico denominado Minitab, para los análisis de medidas de tendencia central y de dispersión.

#### **3.7.2. Representación.**

Las representaciones de la parte experimental se dieron por medio de reportes de laboratorios y gráficas o representaciones en Excel, las relaciones de variables mediante ecuaciones y los análisis estadísticos según el software estadístico desarrollado.

#### **3.7.3. Técnica de comprobación de la hipótesis.**

Para el trabajo de investigación se utilizó el Análisis de varianza mediante una ANOVA de Fisher.

## CAPITULO IV

### 4. ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. Resultados obtenidos en la investigación

##### 4.1.1. Propiedades físicas del suelo.

###### Textura

**Tabla 10:** Textura del suelo antes y después del tratamiento

	<b>Análisis Final</b>	<b>Análisis Inicial</b>
%Arena	46.22	48.93
%Limo	10.98	9.26
%Arcilla	42.80	41.81

Fuente: Elaboración propia

### pH del suelo.

En la tabla 11 se muestran los resultados del pH antes y después del experimento:

**Tabla 11:** Variación del pH del suelo; entre el inicio y el final del experimento.

Suelo	Ácido Húmico	pH inicio	pH final	Variación del pH
S <sub>1</sub>	Compost	7.33	7.73	0.40
		7.29	7.71	0.42
	Estiércol vacuno	7.19	7.54	0.35
		7.17	7.56	0.39
	Humicel 25%	7.23	6.94	-0.29
		7.21	6.96	-0.25
	Testigo	7.41	7.40	-0.01
		7.43	7.6	0.17

Fuente: Elaboración propia

### Conductividad Eléctrica

**Tabla 12:** Variación de la conductividad del suelo al inicio y al final del experimento

Suelo	Ácido Húmico	C.E. inicio	C.E. final	Variación
S <sub>1</sub>	Compost	0.74	1.59	0.85
		0.76	1.63	0.87
	Estiércol vacuno	0.77	1.76	0.99
		0.79	1.78	0.99
	Humicel 25%	0.77	1.93	1.16
		0.75	1.97	1.22
	Testigo	0.73	1.22	0.49
		0.75	1.24	0.49

Fuente: Elaboración propia

## Capacidad de Intercambio Catiónico. (CIC)

**Tabla 13:** Variación de la CIC en el suelo al inicio y al final del experimento.

Suelo	Ácido Húmico	CIC inicio	CIC final	Variación
S <sub>1</sub>	Compost	11.82	18.86	7.04
		11.86	18.9	7.04
	Estiércol vacuno	11.54	22.51	10.97
		11.54	22.55	11.01
	Humicel 25%	12.46	13.45	0.99
		12.50	13.48	0.98
	Testigo	11.28	11.51	0.23
		11.32	11.53	0.21

Fuente: Elaboración propia

## Concentración de cadmio en el suelo

**Tabla 14:** Concentración de suelo en el suelo al inicio y final del experimento.

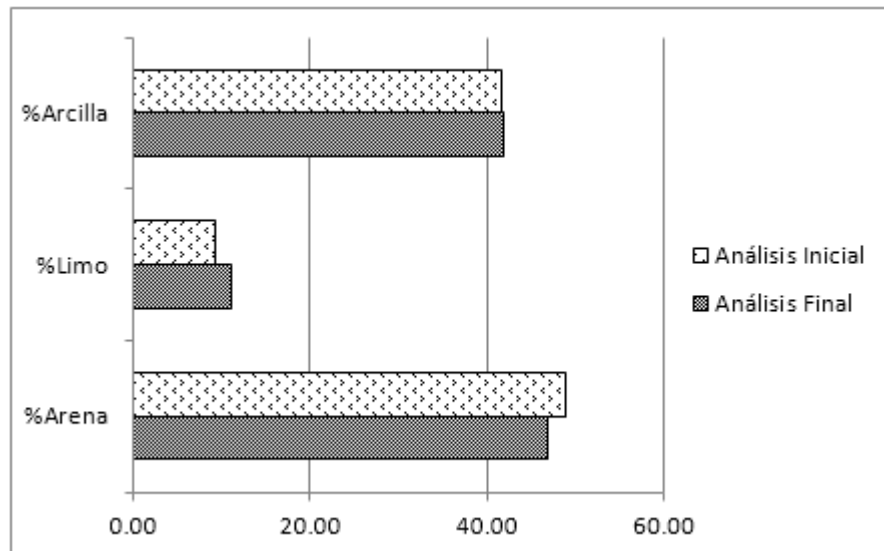
Suelo	Ácido Húmico	Cd inicio	Cd final	% Cd retenido en el suelo
S <sub>1</sub>	Compost	5.19	4.81	92.67
		5.25	4.65	88.57
	Estiércol vacuno	5.41	5.12	94.64
		5.94	5.47	92.20
	Humicel 25%	5.56	4.89	87.76
		6.72	5.21	77.52
	Testigo	6.96	4.84	69.54
		6.77	4.95	73.11

Fuente: Elaboración propia

## 4.2. Discusión de resultados

### Textura

**Gráfica 1:** Variación de la textura del suelo antes y después del tratamiento



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 10, los datos de textura del suelo realizado por el método de USDA se mantiene en arcilla arenosa antes y después de los tratamientos, teniendo en cuenta el porcentaje en peso de cada una de las tres fracciones minerales; arena, limo y arcilla (Thompson, Troeh; 2002).

El suelo contiene un porcentaje de arcilla y arena mayor del 40% (Gráfica 1) demostrándonos que el suelo posee valor agrícola, la arcilla retiene la humedad alrededor de la planta y arena para que sea poroso e ingrese suficiente aire (Adriano, 2001).

#### **4.2.1. Propiedades químicas del suelo.**

Las propiedades químicas que ejercen un efecto directo en la adsorción de los metales son en orden de importancia, el pH, el contenido de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico (Basta, 1993). A continuación, se analizará los resultados de la variación de la concentración de cadmio, el pH, la CIC y la conductividad eléctrica en el suelo agrícola.

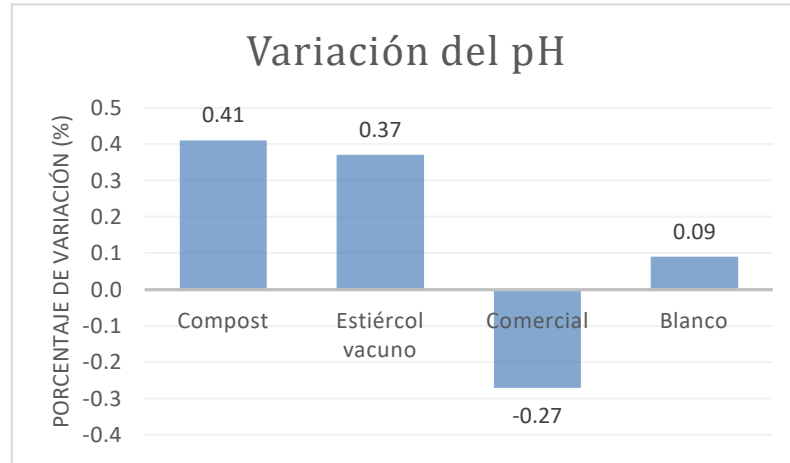
##### **pH del suelo.**

Los resultados de la tabla 11 demuestran que en los tratamientos de estiércol vacuno el incremento de la alcalinidad es mayor mientras que con la incorporación del Humicel 25% se incrementa su acidez con respecto al inicio; esto se puede observar mejor en la gráfica 2.

Según la clasificación en función de las sustancias que ceden protones en unos rangos de pH asociados a las distintas especies químicas realizada por Jackson en 1963, el incremento del pH en la adición de compost y estiércol vacuno podría deberse a la formación de grupos fenólicos de la materia orgánica humificada; sucediendo lo contrario con la incorporación de Humicel 25% ya que la disminución del pH se debería por los grupos orgánicos ácidos de la materia orgánica con mayor grado de humificación.

Según los criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH propuesto por la NOM-021-REC-NAT-2000; el suelo antes de realizar los tratamientos se clasifica en moderadamente ácido y medianamente alcalino; después de los tratamientos se clasifica en neutro y medianamente alcalino.

**Gráfica 2:** Comparación de la variación del pH en el suelo.



Fuente: Elaboración propia

#### ANÁLISIS DE VARIANZA:

**Tabla 15:** ANOVA/ Análisis de varianza - Tipo III: del pH del suelo – intervalo de confianza 95%

Fuente	GDL	F	Pr > F
Nivel de cadmio en el Suelo (S)	2	14.092	0.001
Tipo de enmienda (E)	3	255.203	< 0.0001
Interacción SE	6	5.745	0.006

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del ANOVA para la variación del pH (Tabla 15) muestran que existen diferencias altamente significativas para las fuentes de variación de la concentración de cadmio (suelo muestreado y testigo), tipo de enmienda e interacción.



**Tabla 16:** Comparación múltiple Tukey (HSD) para la variación del pH en los suelos con incorporación de enmiendas orgánicas con una confiabilidad del 95%:

Contraste	Pr > Dif	Signific.	Categoría	Media estimada	Grupos
E <sub>2</sub> vs E <sub>3</sub>	< 0.0001	Si			
E <sub>2</sub> vs E <sub>4</sub>	< 0.0001	Si	E <sub>2</sub>	0.547	A
E <sub>2</sub> vs E <sub>1</sub>	0.006	Si	E <sub>1</sub>	0.420	B
E <sub>1</sub> vs E <sub>3</sub>	< 0.0001	Si	E <sub>4</sub>	0.137	C
E <sub>1</sub> vs E <sub>4</sub>	< 0.0001	Si	E <sub>3</sub>	-0.207	D
E <sub>4</sub> vs E <sub>3</sub>	< 0.0001	Si			

Fuente: Elaboración propia

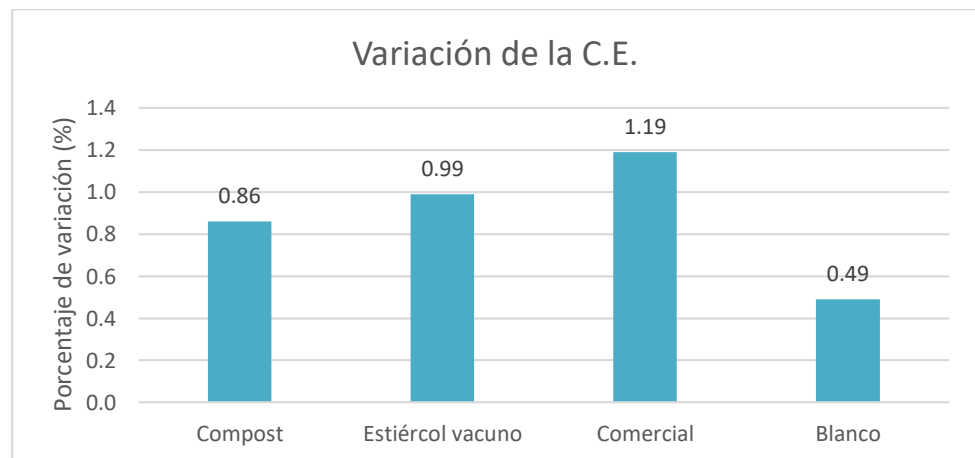
Los resultados de la tabla 16 muestran que existen diferencias significativas en la variación del pH en los suelos al incorporar las diferentes enmiendas orgánicas, donde se observa el incremento de pH cuando se adicionó el estiércol vacuno (E<sub>2</sub>), sucediendo todo lo contrario con el Humicel 25% donde el pH disminuye; esto podría deberse a que el estiércol vacuno tiene un mayor grado de humificación, por lo tanto posee en su estructura los grupos carboxilo (COOH) y OH-fenólico incrementando el pH en el suelo (Schnitzer, 1982); sucediendo lo contrario con el Humicel 25% ya que tiene en su estructura el grupo alcohólico que es más abundante en las primeras etapas de descomposición de la materia orgánica; causando una disminución del pH. (Young & Mourato, 1988).

### **Conductividad Eléctrica (C.E.)**

Los resultados de la tabla 12 demuestran que en los tratamientos con incorporación de la materia orgánica se ha incrementado la conductividad

eléctrica con respecto al inicio, siendo el mayor incremento en el humicel 25% y el estiércol de vacuno, esto se puede visualizar mejor en la gráfica 3; antes de la realización del experimento los suelos se clasificaban como no salinos, luego de los tratamientos su clasificación es de muy ligeramente y ligeramente salino (Smith y Doran, 1996), esto podría deberse a que uno de los efectos negativos de la incorporación de la materia orgánica en el suelo es el incremento de la conductividad eléctrica a niveles no deseables (Albadalejo et al, 1994) ya que la conductividad eléctrica indica la concentración total de los componentes ionizados en las soluciones (Soriano, 2001), este incremento se puede deber a la cantidad de sodio que tienen las diferentes materias orgánicas incorporadas a los suelos; el exceso de sales afecta el equilibrio del suelo y su fertilidad (Luters, 2000). Sin embargo este incremento de la conductividad eléctrica tiene una influencia imperceptible para el cultivo ya que no sobrepasa los 2 dS/m (Tabla de definición Riverside)

**Gráfica 3:** Variación de la C.E



Fuente: Elaboración propia

## ANÁLISIS DE VARIANZA

Los resultados del ANOVA para la variación de la CE (Tabla 17) muestran que existen diferencias altamente significativas para las fuentes de variación de la concentración de cadmio, tipo de enmienda e interacción.

**Tabla 17:** ANOVA/ Análisis de varianza - Tipo III: Suma de cuadrados; de la C.E. del suelo – intervalo de confianza 95%

Fuente	GDL	F	Pr > F
Nivel de cadmio en el suelo	2	52.598	< 0.0001
Tipo de enmienda (E)	3	526.167	< 0.0001
Interacción SE	6	31.000	< 0.0001

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 18:** Comparación múltiple Tukey (HSD) para la variación de la C.E. en los suelos con incorporación de enmiendas orgánicas con una confiabilidad del 95%:

Contraste	Pr > Dif	Significativo	Categoría	Media estimada	Grupos
E <sub>3</sub> vs E <sub>4</sub>	< 0.0001	Si			
E <sub>3</sub> vs E <sub>1</sub>	< 0.0001	Si	E <sub>3</sub>	1.270	A
E <sub>3</sub> vs E <sub>2</sub>	< 0.0001	Si	E <sub>2</sub>	0.987	B
E <sub>2</sub> vs E <sub>4</sub>	< 0.0001	Si	E <sub>1</sub>	0.953	B
E <sub>2</sub> vs E <sub>1</sub>	0.351	No	E <sub>4</sub>	0.517	C
E <sub>1</sub> vs E <sub>4</sub>	< 0.0001	Si			

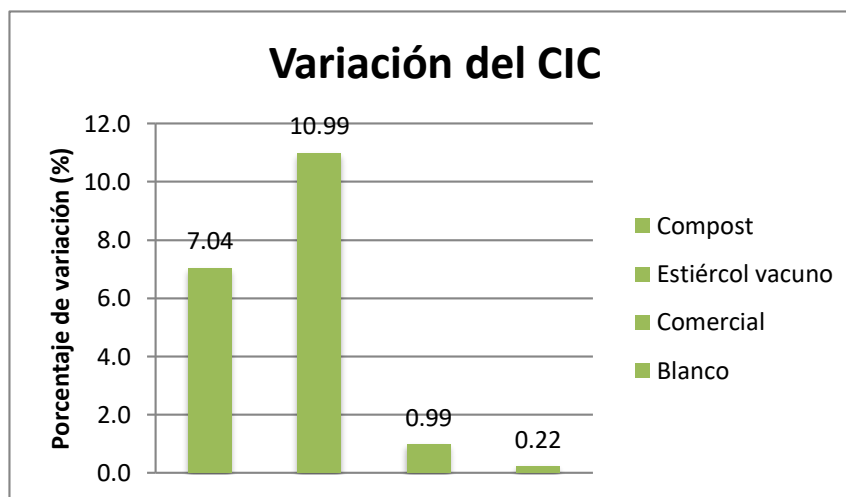
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la tabla 18 muestran que existen diferencias significativas en la variación de la CE en los suelos al incorporar las diferentes enmiendas orgánicas, donde se observa el mayor incremento

con el Humicel 25% (E3), no existiendo diferencia entre el estiércol vacuno (E2) y el compost (E1), siendo la menor variación en los tratamientos donde no se incorporó las enmiendas orgánicas; esto podría deberse que el Humicel 25% contiene iones libres como sodio, potasio, etc. Esto incrementaría la CE ya que para llegar a una cantidad de 8.11 g de AH se ha incorporado más dosis de la recomendada.

### Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

**Gráfica 4:** Comparación de la CIC en el suelo



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 13, hay un incremento de la CIC en todos los tratamientos, uno de los principales componentes del suelo que contribuyen con este incremento es la materia orgánica y cuando mayor sea la CIC mayor será la capacidad del suelo de fijar metales (Mingornace, 2010).

Esto se puede observar mejor en la gráfica 4 donde el incremento mayor de la CIC ha ocurrido con el estiércol vacuno en comparación a los demás

tratamientos; ya que el incremento de la CIC no solo depende de la cantidad o el tipo de materia orgánica que se adicione al suelo sino de su grado de descomposición (Porta, 2003); y como ya se ha mencionado el mayor grado de descomposición ha ocurrido con el estiércol vacuno. Los niveles de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) según la Universidad Agraria La Molina, al inicio clasificaba los suelos en el nivel medio (10 – 15 meq/100 g de suelo), después de la incorporación en los tratamientos con compost y del estiércol de vacuno la CIC alcanzo niveles de alto y muy alto, mejorando la estructura de los suelos, favoreciendo a la aireación del suelo, mejorando la retención de agua, incrementando la actividad microbiana y la fertilidad del suelo e incrementando las reacciones en el suelo de formación (meteorización) (Orquera 2004); mientras que los tratamientos con el Humicel 25% y el testigo se mantienen en un nivel medio.

**Tabla 19:** ANOVA/ Análisis de varianza - Tipo III: Suma de cuadrados; de la CIC del suelo – intervalo de confianza 95%.

<b>Fuente</b>	<b>GDL</b>	<b>F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Nivel de cadmio en el Suelo (S)	2	11.457	0.002
Tipo de enmienda (E)	3	2337.024	< 0.0001
Interacción SE	6	36.937	< 0.0001

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del ANOVA para la variación de la CIC (Tabla 19) muestran que existen diferencias altamente significativas para las fuentes de variación de la concentración de cadmio, tipo de enmienda e interacción.

**Tabla 20:** Comparación múltiple Tukey (HSD) para la variación de la CIC en los suelos con incorporación de enmiendas orgánicas con una confiabilidad del 95%:

Contraste	Pr > Dif	Significativo	Categoría	Media estim.	Grupos
E <sub>2</sub> vs E <sub>4</sub>	< 0.0001	Si			
E <sub>2</sub> vs E <sub>3</sub>	< 0.0001	Si	E <sub>2</sub>	9.390	A
E <sub>2</sub> vs E <sub>1</sub>	< 0.0001	Si	E <sub>1</sub>	6.787	B
E <sub>1</sub> vs E <sub>4</sub>	< 0.0001	Si	E <sub>3</sub>	1.212	C
E <sub>1</sub> vs E <sub>3</sub>	< 0.0001	Si	E <sub>4</sub>	0.650	D
E <sub>3</sub> vs E <sub>4</sub>	0.004	Si			

Fuente: Elaboración propia

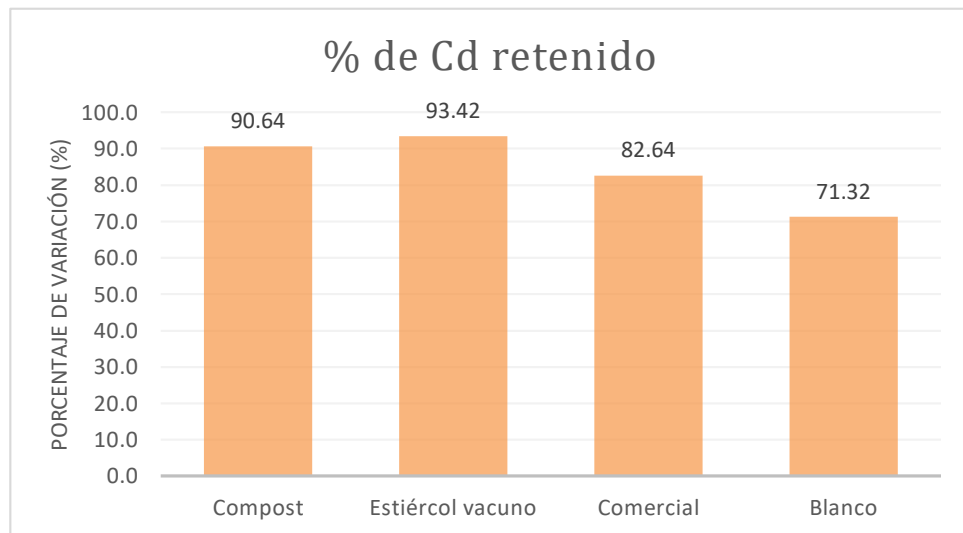
Los resultados de la tabla 20 muestran que existen diferencias significativas en la variación de la CIC en los suelos al incorporar las diferentes enmiendas orgánicas, donde se observa la mayor variación con el estiércol vacuno (E<sub>2</sub>). El estiércol vacuno tiene un alto grado de descomposición incrementando la CIC; esto permite que el proceso de adsorción de la materia orgánica sea específico, es decir exista la formación de complejos con los cationes del cadmio (Stevenson y Fitch, 1986).

#### **Concentración del cadmio en el suelo:**

Se procedió a verificar las concentraciones del cadmio obteniéndose los datos que se muestran en la tabla 14, como se puede ver, los valores de Cd al inicio no difieren significativamente de los esperados. También se muestra la concentración final de cadmio en el suelo y el porcentaje que ha sido retenido en el suelo, siendo mayor en los tratamientos donde se ha incorporado materia orgánica, en comparación al testigo, ya que la materia orgánica tiene una alta superficie aérea y grupos funcionales que son base Lewis (por ejemplo: grupos carboxilos y fenoles) con los que los metales forman enlaces químicos. (Sparks, 1998). Es necesario

destacar que los grupos funcionales de los ácidos húmicos presentan distinta afinidad frente a los iones metálicos (Chaberek y Martell; 1959); formando complejos de esfera interna o quelatos (Sposito; 1989) También se puede observar que el porcentaje de retención de cadmio en el suelo ha sido mayor cuando se aplicó estiércol vacuno, que se puede visualizar mejor en la gráfica 1. Según Porta, 2003, cuando mayor es el grado de humificación de la materia orgánica mayor será mayor el potencial de formar complejos con los metales; esto se mide por el grado de polimerización que se refleja en la madurez de la materia orgánica, esta se evidencia en la relación  $E_4/E_6$ ; donde Stevenson (1994) afirma que este valor se incrementa con el tiempo de compostaje y esto se puede observar con el compost (Zambrano et. al, 2011) indicando que es menos polimerizado en comparación al estiércol vacuno.

**Gráfica 5:** Comparación del % de cadmio retenido en el suelo.



Fuente: Elaboración propia

## ANÁLISIS DE VARIANZA

**Tabla 21:** ANOVA/ Análisis de varianza - Tipo III: del pH del suelo – intervalo de confianza 95%

Fuente	GDL	F	Pr > F
Nivel de cadmio en el Suelo (S)	2	43.042	< 0.0001
Tipo de enmienda (E)	3	157.349	< 0.0001
Interacción SE	6	8.159	0.002

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del ANOVA para el porcentaje de cadmio retenido en los suelos (tabla 21) muestran que existen diferencias altamente significativas para las fuentes de variación concentración de cadmio, tipo de enmienda e interacción.

**Tabla 22:** Comparación múltiple Tukey (HSD) para el porcentaje de retención de en las diferentes enmiendas orgánica en el suelo una confiabilidad del 95%:

Contraste	Pr > Dif	Signific.	Categoría	Media estim.	Grupos
E2 vs E4	< 0.0001	Si			
E2 vs E1	0.000	Si	E2	495.095	A
E2 vs E3	0.007	Si	E3	477.128	B
E3 vs E4	0.016	Si	E1	467.213	B C
E3 vs E1	0.156	No	E4	461.240	C
E1 vs E4	0.531	No			

Fuente: Elaboración propia



Los resultados de la tabla 22 muestran que existen diferencias significativas en el porcentaje de retención de cadmio en los suelos donde se adicionó el estiércol vacuno (E2). La materia orgánica con mayor grado de humificación como es el caso del estiércol vacuno tiene mayor capacidad de intercambio catiónico que se da con los grupos carboxílicos e hidroxílicos, que son potenciales de adsorción para los metales pesados. (Cornejo y Herмосín, 1996)

## CONCLUSIONES

- Se ha logrado reducir la disponibilidad de cadmio hacia la planta a través del proceso de adsorción de las sustancias húmicas y las enmiendas orgánicas como el estiércol vacuno, el compost comercial, y Humicel 25%; teniendo un porcentaje de retención de cadmio en el suelo mayor al 90% para el compost y estiércol vacuno.
- Los análisis físico como la textura del suelo se ha mantenido igual al inicio y al final del experimento, donde el suelo se clasificó como arcillo – arenoso; en los análisis químicos; el pH se incrementó con la incorporación del estiércol de vacuno y el compost; sucediendo lo contrario con el Humicel 25% donde se incrementó la acidez del suelo; la CIC se ha incrementado en los tratamientos con estiércol vacuno y compost llegando a niveles altos, pero se mantienen en nivel medio en el caso del Humicel 25% y los testigos; en todos los tratamientos aplicados al suelo se ha incrementado la conductividad eléctrica, siendo más resaltante, con el Humicel 25% donde el suelo se clasifican en muy ligeramente salino, aunque este parámetro no influye directamente en la disponibilidad de cadmio hacia la planta.
- El pH y la CIC son las propiedades químicas que afectan directamente a la adsorción del cadmio con la materia orgánica teniendo una relación directamente proporcional.
- La enmienda orgánica más efectiva en la adsorción de cadmio es el estiércol vacuno debido a su alto grado de descomposición, al pH y la capacidad de intercambio catiónico del suelo, teniendo un porcentaje de retención del 93.42%.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda incrementar el estudio de los compuestos orgánicos del suelo para ampliar el conocimiento de la dinámica de las sustancias húmicas en los suelos de nuestra región, realizando en las diferentes enmiendas orgánicas el análisis de IRTF, y espectrometría de masas.
- Se recomienda realizar el estudio en una parcela agrícola, para conocer las variaciones que sufren las sustancias húmicas con los cambios climatológicos propios de la sierra.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AEMA-PNUMA. 2002. Con los pies en la Tierra: la degradación del suelo y el desarrollo sostenible en Europa. Un desafío para el siglo XXI. Problemas medioambientales, nº 16. 32 pp. [Fecha de acceso: 06 de junio del 2011]. Disponible:  
[http://www.eea.europa.eu/es/publications/Environmental\\_issue\\_series\\_16](http://www.eea.europa.eu/es/publications/Environmental_issue_series_16)
2. ABDELRAHMAN H. y AL-AJMI H.; Heavy metals in some water and wastewater irrigated soils of Oman; *Commun. Soil Sci. Plant Anal*; 1994; 25 (5-6): 605 – 613 pp.
3. ADEKUNLE I., TOYIN A; Chemical characteristics of Humic Acids in relation to lead, coopera n cadmium level in contaminated soil from south west Nigeria; Department of Chemistry, University of Maiduguri – Nigeria; Julio 2006.
4. ADHIKARI T., ANDERSON J., GOODWIN S.; Identificación and molecular mapping of a gene in wheat conferring resistance to *Mycosphaerella graminicola*; 2003; *Phytopathology*; 1158 - 1164 pp.
5. ADRIANO D; Trace Elements in the Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals; 2nd Edition; New York: Springer-Verlag; 2001. 867 pp.
6. ALBADALEJO J., STOCKING M. y CASTILLO V; Land rehabilitation by urban refuse amendments in a semi-arid environment: effect on soil chemical; properties; 1994; *Soil Technology* 7: 249-260 pp.
7. ANSORENA J., *Sustratos. Propiedades y caracterización del suelo*; Ed. Mundi-Prensa; 1994; 173 pp.
8. BAIRD C.; *Environmental Chemistry*; 2da Edición; Ed. W.H.; 1999; 155 pp
9. BARANCIKOVA G., BRECKOVA V.; DLUGOS J.; Retention of Cadmium by Soils and Humic Acids; Elsevier; 1997; 7 pp.
10. BASTA, N.; Path analysis of heavy metal adsorption by soil; published in *Agon*; 1963: pp 1054-1057 pp.

11. BLAYLOCK M., SALT D, ZARAKOVA O; Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. *Environ. Sci. Technol*; 1997; 31:860-865pp.
12. BOLLO E.; *Lombricultura una Alternativa de Reciclaje*; Mundi - Prensa; España; 199; 150 pp.
13. BRYAN N., JONES M.; *Adv. Colloid Interfacc Sci*; 1998; 78 pp.
14. BUFFLE J., STUMM W.; *General Chemistry of Aquatic System: Chemical and Biological Regulation of Aquatic System*; De Vitre; 1994; 1-42 pp.
15. BURTON KW, MORGAN E, ROIG A.; The influence of heavy metals on the growth of sitka-spruce in South Wales forests. II greenhouse experiments. *Plant Soil*; 1982; 78:271-282 pp.
16. CALDERÍN A, GURIDI F., GARCÍA E.; Material de Origen Natural que retiene cationes de Metales Pesados; *Revista Iberoamericana de Polímeros*; volumen 8, 2007
17. CHABEREK S, MARTELL A.; *Organic Sequestering Agents*; John Wiley & Sons; 1959; 146 pp.
18. CHEFETZ B., HATCHER P. y CHEN Y; Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste; 1996; *J. Environ. Qual.* 25: 776-785 pp.
19. CHEN Y, SENESI N y SCHNITZER M; Information provided on humic substances by E4/E6 ratios; 1977; *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 41: 352-358 pp.
20. CHRISTENSEN N., LINDEMAN W; SALAZAR E.; GIL R.; Nitrogen and carbon dynamics in no-tillage and stubble mulch tillage system; 1994; *Agron. J.* 86:298-303 pp.
21. COLOMBO L., MANGION S., FIGLIOGLIA A.; Soil profile distribution of heavy metals in soil attended with sewage sludge for eight years. *Agr. Med. Inter. J. of Agric. Sci*; 1998; 273-283 pp.
22. COMISION DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS; *Hacia una estrategia temática para la Protección del Suelo*; Bruselas; 2002; 40 pp. [Fecha de

acceso: 12 de junio del 2011] URL disponible en:

<http://mie.esab.upc.es/Estrategia%20para%20la%20proteccion%20suelo>

23. CORNEJO J, HERMOSÍN M.; Interaction of humic substances and soil clays; 1996; Ed. Piccolo;
24. CRISTENSEN D., FORD G.; Separation of partially humified organic materials from soils by ultrasonic dispersion; 8va Edition; Cong. Soil Sci ii; Bucharest; 137-147 pp
25. DAVIES B.; Lead and other heavy metals in urban areas and consequences for the health of their inhabitants; 1995; 287-307 pp; The Pennsylvania Academy of Science, Easton PA, USA.
26. DAVIS J., GLOOR R.; Environment Sci. Technol. 1981; 1223 pp.
27. ENGEBERSTON R. y WANDRUSKA R.; Environ. Sci. Technol; 1994; 1934 pp.
28. ERNS W.; Effects of heavy metals in plants at the cellular and organismic levels; Heidelberg Wiley; 998; 587-620 pp.
29. EVANGELOU V.; Environmental Soil and Water Chemistry: Principles and Applications; John Wiley & Sons; New York; 1995.
30. EVANKO C., DZOMBAK D; Remediation of metals – contaminated soils and groundwater: Groundwater Remediation Technologies Analysis Center (GWRTAC). “E” Series Report; 1997; 53 pp.
31. FOTH H. y ELLIS B.; Soil Fertility; 2nd Ed; Florida; 1997; 290 pp.
32. GARCÍA I., DORRONSORO C.; Tecnología de Suelos: Contaminación por metales pesados; Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. 2005.
33. GREENLAND D.; Separation of partially humified organic materials from soils by ultrasonic dispersion; 8va Edition; Cong. Soil Sci ii; Bucharest; 137-147 pp
34. GULSON B., MIZON K., KORSH M; Non-ore body sources are significant contributors to blood lead of some children with low to moderate lead exposure in a mayor mining community; The science of the total environment; 1996; Ed. 181; 223-230pp.

35. HAYES M., CLAPPS C.; Humic Substances: Consideration of Compositions, Aspects of Structure Environmental Influences; Soil Science - 166 II; 2001; 723 - 737 pp.
36. HOLGREM G., MAYER M., CHENEY R.; Cadmium, Lead, Zinc, Copper and Nickel in agricultural soils of United States of America; 1993; J Environ. Qual; 22:335-348 pp.
37. JACKSON, M.; Inorganic pH dependent cation exchange charge of soils; London; Ed. Pergamon Press; 1963; 281-295 pp.
38. KABATA PENDIAS A., PENDIAS H.; Trace elements in soils and plants; 2nd Edition; CRC Press; London; 1992; 90 pp.
39. KONONOVA M.; Soils Organic Matter: Its nature, its role soil, formation and in soil fertility; Pergamon Press; Oxford; 1966; 544pp.
40. KUMADA K.; Chemistry of the soil organic matter; Elsevier; Tokio - Japan; 1987, 56 pp.
41. LEE S., CHANG L., YANG H.; Absorption characteristics of lead onto soils; J. Haz. Mat; 1998; 63:37-49 pp.
42. LIDE R.; Handbook of Chemistry and Physics; 78 th edition; Boca Raton. FL; 1997; 2512 pp.
43. LOPEZ J.; Manual de Edafología; Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química; 2006; 143 pp.
44. LUTERS Alberto; Área de Investigación de Cartografía de Suelos y Evaluación de Tierras, Instituto de Suelos CRN-CNIA-INIA; 2000; pp 85.
45. MARTINEZ SANCHEZ M., PÉREZ C.; Desertificación: Monitorización mediante indicadores de degradación química. Programa de iniciativa comunitaria INTERREG IIIB ESPACIO MEDOCC. Proyecto Desernet. Acción piloto Región de Murcia. Ed. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente; 2005; 765 pp.
46. MEISSL K., SMIDT E.; BINNER E. u LECHNER P.; A new analytical approach to determine compost quality. En: Compost and digestate:

- sustainability, benefits, impacts for the environment and for plant production; 2008; Ed. Tamm, L. y Schenk, K; 40 pp.
47. MC BRIDE; Environmental chemistry of soils;1994; Oxford Univ; New York;123 p.
48. MINGORNACE D.; Focused microwave-assisted digestion of vegetal materials for the determination of essential mineral nutrients; 2010; Analytical and Bioanalytical Chemistry: 373: 153–158 pp.
49. MISHRA A., CHOUDHARI M.; Amelioration of lead and mercury effects on germination and rice seedling growth by antioxidant; Biol. Plant;1998; 469-473 p.
50. MOSQUERA C.; BRAVO I. y HANSEN E.; Comportamiento estructural de los ácidos húmicos obtenidos de un suelo andisol del departamento del cauca; 2007; Revista Colombiana de Química, 36 (1):31-41pp.
51. MSAKY J. y CALVET R; Adsorption behavior of copper and zinc in soils: influence of pH on adsorption characteristics; 1990; Soil Science. 150, 513-522 p.
52. NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000;  
[http://s3.esoft.com.mx/esofthands/include/upload\\_files/4/Archivos/NOM-021-SEMARNAT-2000.pdf](http://s3.esoft.com.mx/esofthands/include/upload_files/4/Archivos/NOM-021-SEMARNAT-2000.pdf).
53. ORQUERA Arturo; Interpretación de Análisis de Suelos; Universidad Central de Ecuador; 2004.
54. PERDUE E.;Humic Substance in Soil, Sediment and Water: Acidic functional groups of Humic Substance; John Wiley & Sons; New York; 1985; 495- 526 pp.
55. PORTA Jaime, LOPEZ Acevedo; Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente: Degradación de Suelos y Calidad Ambiental; 3ra Edición; Madrid, Mundi - Prensa; 2003.
56. PROYECTO “EL MANTARO REVIVE”; “Fortalecimiento de las capacidades locales para la descontaminación y recuperación de la cuenca del Mantaro,

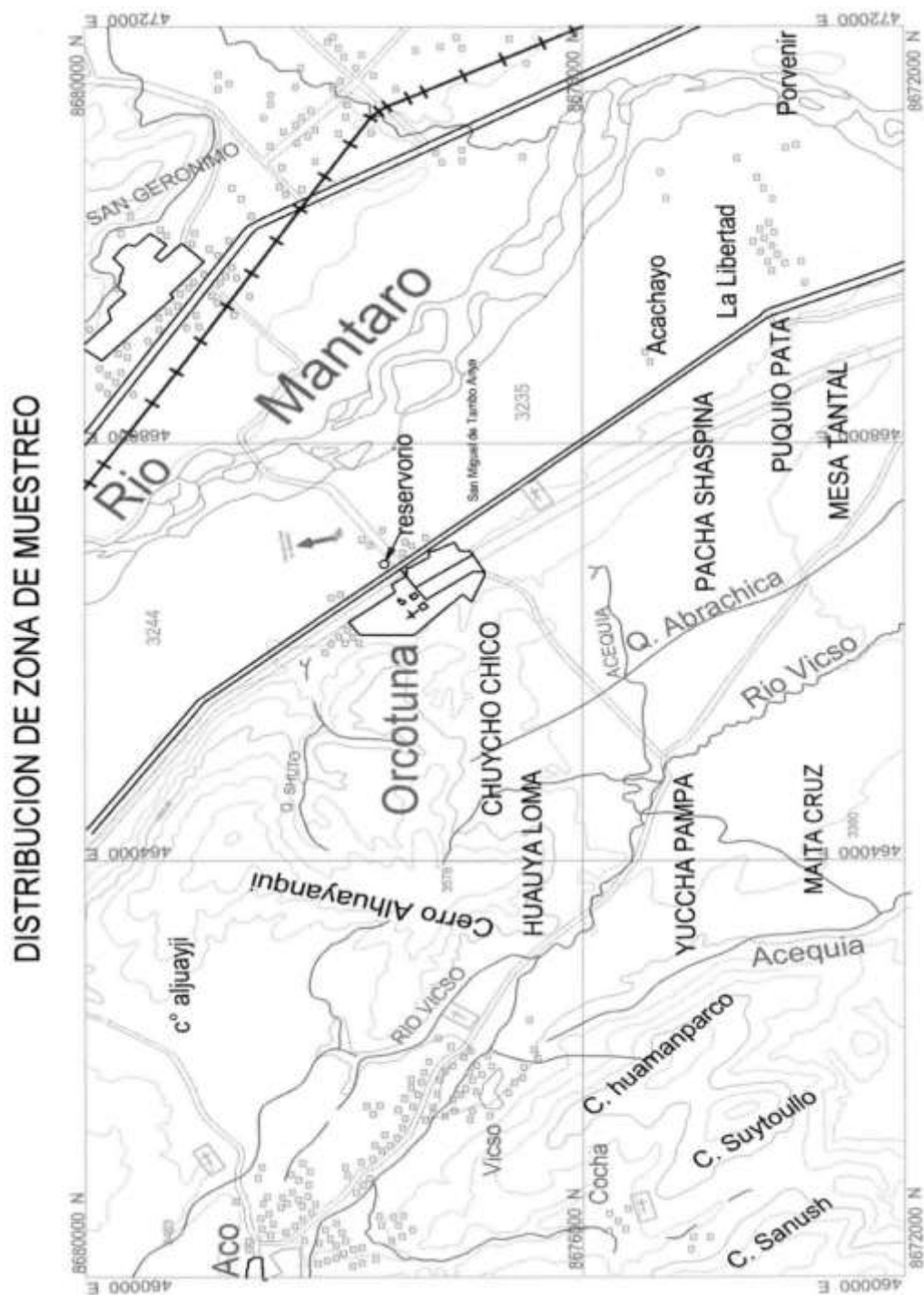


- mediante la implementación de gestión ambiental para contribuir al desarrollo sostenible de la Región Junín”; Fondo Ítalo Peruano; 2007; 126 pp.
57. RAMOS Roberto; Aplicación de las Sustancias Húmicas Comerciales como Productos de Acción de Bioestimulación. Efectos frente al estrés salino; Tesis; Universidad de Alicante; 2000; 350 pp.
  58. RASHID A.; Molecular Mechanism of Action of Pb +2 and Zn +2 on water oxidizing complex of photosystem II; Febs; 1994; 350 pp.
  59. RICE J.; Humin; Soil Science 166 - II; 2001; 848 - 857 pp.
  60. SCHNITZER M.; Organic matter characterization in Methods of Soil Analysis; 2da Edición; Madinson - Wisconsin; 1982; 594 pp.
  61. SCHWERTMANN U. y TAYLOR R.; Iron oxides; 1989; In:Dixon JB, Weed SR, editors. Minerals in Soils Environments. 2nd ed. Madison, Wisconsin: Soil Sci Soc: 379-439 pp.
  62. SEREGIN I., IVANIOV V.; Histochemical investigation of cadmium and lead distribution in plants; Fiziol. Rast.; 1998; 921 pp.
  63. SORIANO Desamparados, PONS Marti; Prácticas de Edafología y Climatología, Universidad Politecnica de Madrid, 2001
  64. SOTO G.; MELENDEZ G.; Taller de Abonos Orgánicos; Centro de Investigaciones Agronómicas CIA - UCR; Sabanilla, 2003.
  65. SPARKS D.; Environmental Soil Chemistry; Academic Press; San Diego; USA; 1995.
  66. SPOSITO G.; The Chemistry of Soil; Oxford University Press; New York, 1989.
  67. STEELINK C.; Humic Substances in Soil, Sediments and Water: Implications of elemental characteristics of humic substance; Wiley Interscience; New York; 1985; 457 - 466 pp.
  68. STEVENSON F.; Humus Chemistry: Genesis, Composition and Reactions; 2da Edition; John Wiley & Sons; 1994; 497 pp.
  69. STEVENSON F. y FITCH A.; Chemistry of complexation of metal ions with soil solution organics; Interactions of soil minerals with natural organics and

- microbes; 1986; Soil Sci. Soc. Special Publ. No 17, Soil Sci Soc. Amer: Madison, 618 pp.
70. STEVENSON F. y GOH K.; Infrared spectra of humic acids and related substances; 1971; *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35 (5): 471-483 pp.
71. SUMMER R., ROBERTS J.; *Colloid Interface Sci*; 1988; 2da Edition; 367 pp.
72. SWIFT R.; *Macromolecular Properties of Soil Humic Substance: Fact, Fiction and Opinion*; *Soil Science - 164 II*; 1999; 709 - 802 pp.
73. SWIFT R. y MCLAREN R.; *Micronutrient sorption by soil and soil colloids*; 1991; Kluwerr Academic Publ., Dordrecht, The Neatherlands; 275-292 pp.
74. THOMPSON L., TROEH F.; *Los suelos y su Fertilidad*; 4ta Edición; Reverté; 2002; 657 pp.
75. TIPPING E.; *Geochim. Cosmochim.*; 1981; 191 pp.
76. USDA Departamento de Agricultura de los Estados Unidos; *Claves para la Taxonomía de los Suelos*; 10ma Edición; 2006; 339 pp.
77. VAN ASSCHE F., CLIJSTERS H.; *Effects of metal on enzyme activity in plants*. *Plant Cell Environ*; 1995; 195-206 pp.
78. YONG R.; MOURATO D.; *Geochemistry: Insolation and Characterization*; 1988; 599 - 607 pp.
79. ZAMBRANO A.; CONTRERAS F.; PAOLINI J. y RIVERO C.; *Caracterización espectroscópica de enmiendas orgánicas*; *Avances de investigación agropecuaria*; Venezuela; 2010; 76 pp.
80. ZHOU J. y ROWLAND S., *Water Ressidual*, 1994, 3ra Edition, 571 pp.
- 81.

## **ANEXOS**

# ANEXO 01 – MAPA DE DISTRIBUCION DE LA ZONA DE MUESTREO



## **ANEXO 02 – ANÁLISIS REALIZADOS**

### **A. Parámetros de análisis de suelos agrícolas**

#### **A1. Textura del suelo por el procedimiento de Bouyoucos**

(AS-09 NOM-021-RECNAT-2000)

##### **1. Reactivos:**

- Agua oxigenada al 30%.
- Oxalato de sodio saturado. Disolver 30 g de oxalato de sodio en 1 litro de agua.
- Metasilicato de sodio con 36 g/l de lectura con el hidrómetro. Disolver 50 g de metasilicato de sodio en 1 litro de agua ajustar la solución

##### **2. Material y equipo:**

- Hidrómetro de Bouyoucos con escala de 0-60.
- Probetas de 1000 cc. o Cilindro de Bouyoucos.
- Agitador con motor para dispersión.
- Agitador de mano.
- Termómetro de -10 a 110°C.

##### **3. Procedimiento**

- Pesar 60 g de suelo de textura fino o 120 g de suelo de textura gruesa en un vaso de precipitado de 500 ml agregar 40 ml de agua oxigenada y poner a evaporar hasta sequedad, agregar otros 40 ml y observar la reacción. Evaporar nuevamente a sequedad. Repetir hasta que no haya efervescencia al agua oxigenada.

- En general dos ataques son suficientes para la mayoría de suelos. Después de eliminar la materia orgánica y llevar a sequedad el suelo, pesar 50 g de suelo de textura arcillosa o 100 g de suelo de textura arenosa y ponerlos en un vaso de precipitado de 250 ml.
- Adicionar agua hasta cubrir la superficie con una lámina de 2 cm. Agregar 5 ml de oxalato de sodio y 5 ml de metasilicato de sodio y dejar reposar durante 15 minutos. Si el suelo tiene mucha arcilla puede prolongarse el tiempo hasta media hora.
- Pasar las muestras de los vasos de precipitado a las copas del agitador mecánico, pasando todo el material con la ayuda de una piceta. Activar los agitadores y proceder a dispersar cinco minutos. Al finalizar el tiempo de agitación, bajar la copa del dispersor y pasar el contenido a una probeta de 1000 ml o al cilindro de Bouyoucos enjuagando la copa con ayuda de una piceta.
- Agregar agua destilada hasta completar un litro con el hidrómetro dentro de la suspensión en el caso de la probeta y si utiliza el cilindro de Bouyoucos llevar a la marca inferior con el hidrómetro dentro de la suspensión. Sacar el hidrómetro y suspender el suelo con un agitador de mano operando durante un minuto.
- Tomar las lecturas del hidrómetro a los 40 segundos y después de 2 horas de terminada la dispersión con el agitador de mano.
- Para hacer una lectura, colocar el hidrómetro dentro de la probeta 20 segundos antes del momento de la determinación, cuidando de alterar lo menos posible la suspensión.
- Después de hacer la lectura se seca el hidrómetro, se lava, se seca y se toma la temperatura. Si por alguna razón al hacer la lectura se acumula espuma alrededor del hidrómetro, agregar unas gotas de alcohol etílico.

#### **4. Cálculos:**

Corregir las lecturas del hidrómetro agregando 0.36 por cada grado centígrado arriba de 19.5°C restando la misma cantidad por cada grado abajo de dicha temperatura (Tabla de corrección por temperatura). La lectura a los 40 segundos multiplicada por 2 es igual al porcentaje de arcilla más limo. Restando de 100 se obtiene el porcentaje de arena. La lectura obtenida a 2 horas multiplicadas por 2 es igual al porcentaje de arcilla. El porcentaje de limo se obtiene por diferencia. Cuando se usan 100g no debe multiplicarse por 2 ya que el hidrómetro está calibrado en porcentajes considerando 100 g de suelo. Con los porcentajes de limo, arena y arcilla se determina la textura correspondiente con el triángulo de texturas.

### **A2. Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**

#### **1. Reactivos**

Los reactivos que a continuación se mencionan deben ser grado analítico a menos que se indique otra cosa, cuando se hable de agua se debe entender agua desionizada o destilada. Las soluciones para este análisis deben almacenarse en recipientes de polietileno.

- Solución de acetato de amonio 1.0N, pH 7.0. Pesar, disolver y trasvasar a una fiola 77g de acetato de amonio ( $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ ), aforar con agua destilada hasta 1L. Luego ajustar a pH 7.0 la solución con unas gotas de ácido acético glacial ó Hidróxido de Amonio q.p según sea necesario.
- Alcohol etílico, usar  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  grado industrial.
- Solución de cloruro de potasio al 1N. Pesar 74.5 g de cloruro de potasio q.p trasvasar y aforar con agua destilada a una fiola de 1L.
- Indicador mixto. Mezclar 20 mL de rojo de metileno al 0.66% y 20 ml de azul de metileno al 0.99%. Ambos disueltos en etanol al 95%.

- Solución de ácido bórico al 2%: pesar 20 gr. de  $H_3BO_3$  y trasvasar a una fiola de 1L, luego aforar con agua destilada, la solución debe contener 10 ml del indicador mixto por litro preparado.
- Hidróxido de sodio al 10N con indicador fenolftaleína. Disolver 400 g. de NaOH en agua destilada y llevar a 1000 ml.
- Solución de Ácido sulfúrico al 0.02N.
- Cloruro de Lantano 1%.

## 2. Materiales

- Equipo Kjeldahl.
- Pipetas volumétricas (1, 2, 3, 5 ml).
- Balanza analítica.
- Vasos de precipitación (150 ml).
- Balones de destilación (300 ml.)
- Pipeta dispensadora volumen fijo "DISPEN-FIX".
- Bureta con dosificador acoplado (50 ml).
- Frasco para dosificadores.
- Agitador magnético.
- Magneto.
- Matraz (250 ml).
- Varilla magnética.
- Papeles filtro.
- Embudos.



### 3. Procedimiento

- Pesar 2.5 g de la muestra secado al aire y tamizado por malla de abertura de 2 mm y colocar en un embudo que contenga papel filtro Whatman N° 2 o su equivalente.
- Lavar la muestra que quedó del procedimiento 1 con agua destilada para eliminar las sales solubles y desechar el lavado.
- Lavar la muestra que quedó del procedimiento 2 con 50 ml de acetato de amonio. Recibir el lavado para determinar los cationes cambiabiles (Solución A).
- Lavar la muestra que quedó del procedimiento 3 con alcohol etílico para remover el exceso de amonio y desechar el lavado.
- Lavarla muestra que quedó del procedimiento 4 con 50 ml de cloruro de potasio (KCl) al 1N. Recibir el extracto en un vaso de precipitación.
- Coger 25 ml del extracto en un balón de 100 ml.
- Determinar el amonio a partir de la alícuota de 10 ml, a la cual se le agregan aproximadamente 10 ml de NaOH al 10N y se conecta al equipo destilación de microkjeldahl. Recoger el producto de la destilación en un matraz Erlenmeyer que contenga 20 ml de mezcla de indicador y ácido bórico. Titular el destilado con ácido sulfúrico al 0.02N y realizar los cálculos.

### 4. Cálculos

La capacidad de intercambio catiónico expresado en **meq / 100 g de suelo** se calculará de la siguiente forma:

$$CIC = 100 * G * N * \frac{V_1}{V_2 * P}$$

En donde:

P = Peso de suelo secado al aire (g).

G = Gasto de volumen ml de  $H_2SO_4$  empleado al titular lo destilado en la solución de ácido bórico.

V1 = Volumen de lavado ml (paso5)

V2 = Volumen de muestra para análisis ml (paso6).

N = Normalidad del  $H_2SO_4$ .

### **A3. Determinación del potencial de hidrógeno medido en agua.**

(AS-02 NOM-021-RECNAT-2000)

#### **1. Reactivo**

- Agua destilada o desionizada.
- Soluciones reguladoras de referencia, pH 4.00, 7.00 y 10.00, las cuales se adquieren preparadas o concentradas para diluirse de acuerdo a la instrucción. Estas soluciones deben estar a temperatura ambiente al momento de calibrar el medidor de pH.

#### **2. Material y equipo**

- Potenciómetro o medidor de pH equipado con electrodo de vidrio en combinación con electrodo de referencia.
- Balanza analítica (Santorius Basic, modelo BA210S).
- Frascos de vidrio o plástico transparente de boca ancha (capacidad de 50 a 100 ml).
- Pipeta volumétrica de 20 ml.
- Varilla de vidrio que sirva como agitador manual.
- Piceta.

#### **3. Procedimiento**

- Pesar 10 g de suelo en un frasco de vidrio o plástico de boca ancha.
- Adicionar 20 ml. de agua destilada al frasco conteniendo el suelo.
- Con una varilla de vidrio, agitar manualmente la mezcla de suelo: agua a intervalos de 5 minutos, durante 30 minutos.
- Dejar reposar durante 15 minutos.

- Calibrar el medidor de pH con las soluciones reguladores pH 4.00 y 7.00 o 7.00 y 10.00 según el suelo, enjuagando con agua destilada los electrodos antes de iniciar las lecturas de las muestras.
- Agite nuevamente la suspensión e introduzca el electrodo en la suspensión.
- Registre el pH al momento en que la lectura se haya estabilizado.

#### **A4. Determinación de la conductividad eléctrica medido en agua.**

(AS-03 NOM-021-RECNAT-2000)

##### **1. Reactivos**

- Agua destilada o desionizada.
- Soluciones reguladoras de referencia, las cuales se adquieren preparadas o concentradas para diluirse de acuerdo a la instrucción. Estas soluciones deben estar a temperatura ambiente al momento de calibrar el medidor de la conductividad eléctrica.

##### **2. Material y equipo**

- Potenciómetro o medidor de conductividad eléctrica equipado con electrodo de vidrio en combinación con electrodo de referencia.
- Balanza analítica (Santorius Basic, modelo BA210S).
- Frascos de vidrio o plástico transparente de boca ancha (capacidad de 50 a 100 ml).
- Pipeta volumétrica de 20 ml.
- Varilla de vidrio que sirva como agitador manual.
- Piceta.

##### **3. Procedimiento**

- Pesar 10 g de suelo en un frasco de vidrio o plástico de boca ancha.
- Adicionar 10 ml. de agua destilada al frasco conteniendo el suelo.
- Con una varilla de vidrio, agitar manualmente la mezcla de suelo: agua a intervalos de 5 minutos, durante 30 minutos.
- Dejar reposar durante 15 minutos.
- Calibrar el medidor de conductividad eléctrica con las soluciones reguladores según el suelo, enjuagando con agua destilada los electrodos antes de iniciar las lecturas de las muestras.

- Agite nuevamente la suspensión e introduzca el electrodo en la suspensión.
- Registre la conductividad eléctrica al momento en que la lectura se haya estabilizado.

## **A5. Determinación del extracto húmico total y ácidos húmicos**

### **1. Reactivos**

- Dicromato potásico 1N
- Ácido fosfórico 85 por 100
- Ortofenantrolina (0.5 g se disuelven en 20 ml de agua y se añaden 100 ml de ácido sulfúrico)
- Sal de Mohr 0.5 N
- Solución extractante de pirofosfato 0.1 M- sosa 0.1 N recientemente preparada. Mezclar 44.5 g de  $P_2O_7Na_4 \cdot 10H_2O$  y 4 g. de NaOH enrasando a un litro con agua.
- Ácido sulfúrico (1:1)
- Hidróxido sódico 0.5 N
- Ácido sulfúrico 0.001 N

### **2. Material y equipo**

- Tubos de centrifuga de 200 ml
- Baño de agua
- pH-metro
- Agitador de vaivén
- Centrifuga
- Estufa de aire forzado o normal

### **3. Procedimiento**

#### **3.1 Extracción:**

- Desecar la muestra a 50- 60°C durante cuarenta y ocho horas de estufa de aire forzado o a 100 °C durante veinticuatro horas en estufa normal, pulverizando a continuación hasta obtener una muestra fina y homogénea.
- Pesar, con precisión de 0,1 mg., la cantidad de muestra necesaria (ver 4.6.1) e introducirla en un tubo de centrífuga de 200 ml de capacidad. Añadir, 100 ml de solución extractante 4.3.5 recientemente preparada.
- Agitar durante una hora, en agitador de vaivén a la máxima velocidad posible y centrifugar a 4.500 r.p.m. durante veinticinco minutos como máximo. Repetir esta operación hasta que el líquido de extracción sea incoloro o ligeramente colorado (el número de repeticiones no debe pasar de cinco. Ver 4.6.2.)
- Reunir todos los líquidos de las centrifugaciones en un matraz de un litro, enrasando con agua destilada. A esta solución se le denomina “Extracto húmico total”.

### 3.2 Valoración del carbono orgánico del extracto húmico

- Tomar 50 ml del extracto y llevar a un vaso o matraz de 500 ml., evaporando el baño de agua hasta sequedad.
- Añadir 10 ml. de solución normal de  $K_2Cr_2O_7$  y a continuación 20 ml. de ácido sulfúrico concentrado, agitando suavemente durante un minuto. Dejar reposar durante treinta minutos (tiempo de oxidación).
- Transcurrido este tiempo, añadir 200 ml. de agua destilada y 10 ml. de  $H_3PO_4$ , dejando enfriar. A continuación, añadir un ml. de difenilamina y valorar con sal de Mohr, comparando con una prueba en blanco.

$$\text{Porcentaje de C} = \frac{(V - V') \cdot N \cdot f \cdot 0.39}{P}$$

Porcentaje de extracto húmico total = porcentaje de C x 1.724



Siendo:

V = volumen en ml. de sal de Mohr gastados en la prueba de blanco

V' = volumen en ml de sal de Mohr gastados en el problema.

N = normalidad de la sal de Mohr.

P = peso, en gramos de la muestra en la alícuota.

0.39 = factor que resulta de considerar que por este método solo se oxida el 77% del carbono existente en la muestra.

### **3.2 Precipitación de ácidos húmicos:**

- Tomar 200 ml. de la solución extracto húmico total y añadir ácido sulfúrico 1:1 agitando lentamente y sin turbulencias hasta pH =1
- Dejar reposar durante unas ocho horas.
- Transcurrido este tiempo centrifugar a 4.500 r.p.m. durante veinticinco minutos como máximo, para separar el precipitado de ácidos húmicos. Lavar el precipitado una vez lavado con sosa 0,5N, llevándolo a un matraz aforado de 50 ml. y enrasando con agua destilada.
- A esta solución se la denomina “solución de ácidos húmicos”.

### **3.3 Valoración de los ácidos húmicos.**

Tomar una parte alícuota de esta solución de ácidos húmicos, evaporar a sequedad (25 ml.) en un vaso o matraz de 500 ml., valorar y expresar el resultado como porcentaje de ácidos húmicos.

## **A6. Determinación de cadmio en suelos**

### **1. Reactivos**

- Ácido nítrico Q.P.
- Ácido Perclórico Q.P.
- Solución de ataque nítrico / perclórico relación 5/1

### **2. Materiales y equipos**

- Erlenmeyer de 125 ml
- Pipetas
- Fiolas de 25 ml
- Papel filtro lento
- Balanza analítica
- Plancha para atacar las muestras
- Equipo de Absorción Atómica

### **3. Procedimiento**

- Pesar 2 g de muestra seca
- Colocar en el Erlenmeyer de 125 ml
- Adicionar 20 ml. de la solución de ataque
- Colocar en la plancha para la digestión, a temperatura de 250°C de 3 a 4 horas hasta un estado pastoso (no dejar secar la muestra)
- Dejar enfriar y llevar a volumen de 25 ml con agua destilada con una fiola.
- Luego filtrar la muestra (papel filtro lento)
- Recolectar el filtrado para el análisis en el equipo de absorción atómica.

## **A7. Determinación de plomo por el método de Absorción Atómica**

### **1. Reactivos**

- Estándar de plomo grado analítico de  $1000 \pm 3 \mu\text{g/mL}$ , High-purity Standards, No. Catálogo 100028-2. Preparar los estándares de plomo en solución de HCl 1N con las siguientes concentraciones: 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 ppm.
- Estándar de cadmio grado analítico de  $1004 \mu\text{g/mL}$ , Aldrich, No. Catálogo 20,701-2. Preparar los estándares de cadmio en solución de HCl 1N con las siguientes concentraciones: 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6 ppm.
- Solución blanco: solución de HCl 1N.
- Soluciones de muestras.
- Agua desionizada.

### **2. Material y equipo**

- Espectrofotómetro de absorción atómica equipado para flama. VARIAN spectrAA 110/220FS. El equipo debe estar calibrado antes de su operación.
- Lámpara de cátodo hueco de alta intensidad Pb Varian UltrAA No. de parte 5610108200.
- Vasos de precipitado de 250 ml.

### **3. Condiciones instrumentales para la lectura de Plomo**

- Corriente de la lámpara: 10.0mA
- Longitud de onda: 217 nm
- Paso de luz: 1.0 nm
- Flujo de aire: 13.50 l/min
- Flama utilizada: Aire/Acetileno
- Flujo de acetileno: 2.00 l/min

## **A8. Determinación de plomo en muestras foliares**

### **1. Reactivos**

- Ácido nítrico Q.P.
- Ácido Perclórico Q.P.
- Solución de ataque nítrico / perclórico relación 5/1

### **2. Materiales y equipos**

- Erlenmeyer de 125 ml
- Pipetas
- Fiolas de 25 ml
- Papel filtro lento
- Balanza analítica
- Plancha para atacar las muestras
- Equipo de Absorción Atómica

### **3. Procedimiento**

- Pesar 1 g de muestra seca
- Colocar en el erlenmeyer de 125 ml
- Adicionar 15 ml. de la solución de ataque
- Colocar en la plancha para la digestión, a temperatura de 250°C de 2 a 3 horas hasta que la muestra quede cristalina
- Dejar enfriar y llevar a volumen de 25 ml con agua destilada con una fiola.
- Luego filtrar la muestra (papel filtro lento)
- Recolectar el filtrado para el análisis en el equipo de absorción atómica.

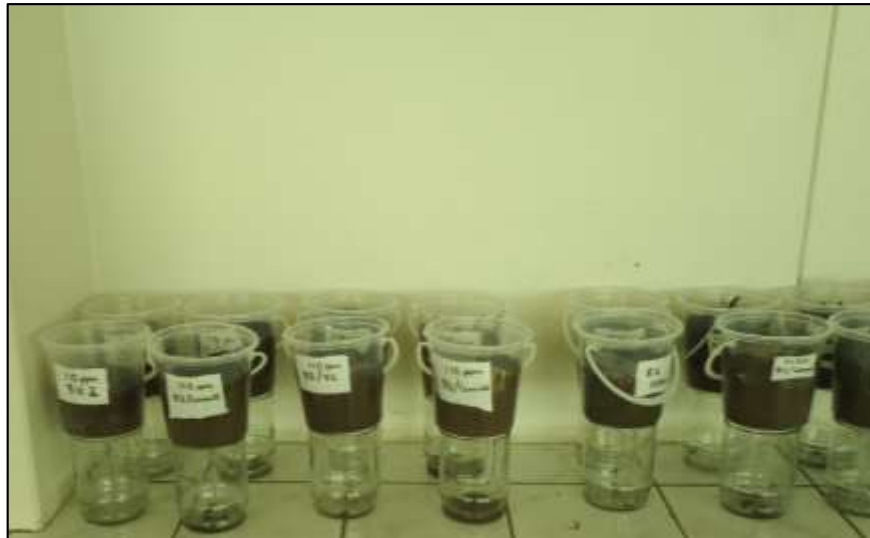
## ANEXO 03 – REGISTRO FOTOGRÁFICO



**Foto 1:** Lugar de muestreo de suelo – distrito de Orcotuna



**Foto 2:** Homogenización de suelo



**Foto 3:** Muestras en el labotaorio con las sustancias húmicas incorporadas



**Foto 4.** Muestras en el pequeño invernadero



**Foto 5:** Crecimiento de la planta



**Foto 6:** Digestión de las muestras de suelo para análisis de cadmio.



**Foto 7:** Análisis de CIC



**Foto 8:** Análisis de Textura





**Foto 9:** Raíz de la planta antes de la determinación de cadmio en el suelo