



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS**

**“ESTUDIO DE ADSORCIÓN Y DESORCIÓN DE CADMIO (II) POR  
UN ANDOSOL RICO EN ALOFÁN TOMADO DE UN YACIMIENTO  
UBICADO EN LA PROVINCIA DE SANTO DOMINGO DE LOS  
TSÁCHILAS”**

**Trabajo de Titulación presentado para optar el grado académico de:  
INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL**

**AUTOR: DIEGO FABRICIO MOYANO RODRÍGUEZ**  
**TUTORA: DRA. NANCY VELOZ**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2016**

©2016, Diego Fabricio Moyano Rodríguez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS**

El tribunal de tesis certifica que: El trabajo de investigación: **“ESTUDIO DE ADSORCIÓN Y DESORCIÓN DE CADMIO (II) POR UN ANDOSOL RICO EN ALOFÁN TOMADO DE UN YACIMIENTO UBICADO EN LA PROVINCIA DE SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS”**, de responsabilidad del egresado Sr. Diego Fabricio Moyano Rodríguez ha sido prolijamente revisado por los Miembros del Tribunal de Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Dra. Nancy Veloz <b>DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACION</b>	.....	.....
Dr. Roberto Erazo <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	.....	.....

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Yo, Diego Fabricio Moyano Rodríguez, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Riobamba, 23 de Noviembre del 2016

Diego Fabricio Moyano Rodríguez

C.I. 060460287-0

Yo, Diego Fabricio Moyano Rodríguez, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta tesis; y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.

Diego Fabricio Moyano Rodríguez

## **AGRADECIMIENTO**

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y a todas sus Autoridades que día a día se esmeran por el desarrollo de la institución y por contribuir con los conocimientos necesarios para ser excelentes profesionales.

A mí querida madre y mis hermanos que me apoyaron incondicionalmente con todo su cariño y comprensión.

A quienes hicieron posible toda esta investigación con el apoyo y financiamiento al Centro de Servicios Técnicos y Transferencia Tecnológico Ambiental (CESTTA).

A la Dra. Nancy Veloz, al Dr. Roberto Erazo, por su apoyo y el tiempo dedicado en la realización de este proyecto.

Y un agradecimiento a todas las personas que compartieron junto a mí momentos de alegría y tristeza y me ayudaron a superar los diferentes problemas que encontré en el camino.

*Diego*

## **DEDICATORIA**

A mi madre Lourdes Rodríguez, que con su esfuerzo, perseverancia, paciencia y sabiduría me ha impulsado a seguir adelante en todos los momentos de mi vida personal y estudiantil para lograr mi triunfo profesional. A mis hermanos Jessica, Bryan y Erick, que estuvieron siempre a mi lado brindándome su incondicional apoyo, además de incentivar me para seguir superándome.

*Diego*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	xi
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xii
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS</b> .....	xiii
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	xiv
<b>ÍNDICE DE ABREVIATURAS</b> .....	xv
<b>RESUMEN</b> .....	xvi
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPITULO I.</b> .....	5
1. <b>MARCO TEÓRICO</b> .....	5
1.1 CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	5
1.1.1 <i>Contaminación de Aguas con Tóxicos Persistentes</i> .....	5
1.2 METALES PESADOS .....	6
1.2.1 <i>Contaminación por metales pesados</i> .....	7
1.3 CADMIO (Cd) .....	8
1.3.1 <i>El Cadmio en el medio ambiente</i> .....	8
1.3.2 <i>Fuentes del cadmio</i> .....	9
1.3.3 <i>Efectos en la salud</i> .....	9
1.4 ANDOSOL .....	11
1.5 ALOFÁN.....	14
1.6 ÁREA SUPERFICIAL .....	16
1.7 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO.....	17
1.8 ADSORCIÓN.....	17
1.8.1 <i>Adsorción Física</i> .....	19
1.8.2 <i>Adsorción Química</i> .....	19
1.8.3 <i>Tipos de Adsorbentes</i> .....	19
1.8.3.1 <i>Arcillas</i> .....	19
1.8.3.2 <i>Zeolita</i> .....	20
1.8.3.3 <i>Carbón Activado</i> .....	20
1.8.3.4 <i>Gel de sílice</i> .....	21

1.8.4	<i>Adsorción en el suelo</i> .....	21
1.8.5	<i>Equilibrio de adsorción</i> .....	22
1.8.6	<i>Cinética de adsorción</i> .....	23
1.8.6.1	<i>Modelos cinéticos de adsorción</i> .....	24
1.9	ISOTERMAS DE ADSORCIÓN .....	25
1.9.1	<i>Modelos de isothermas</i> .....	27
1.9.1.1	<i>La Isoterma de Langmuir:</i> .....	27
1.9.1.2	<i>La isoterma de Freundlich</i> .....	28
1.10	DESORCIÓN .....	29
1.11	MARCO LEGAL .....	30
<b>CAPÍTULO II</b> .....		31
<b>2</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	31
2.1	UNIDAD DE ESTUDIO .....	31
2.1.1	<i>Localización</i> .....	31
2.1.2	<i>Población de estudio</i> .....	31
2.2	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	32
2.2.1	<i>Tipos de Variables</i> .....	32
2.2.2	<i>Variables Independientes</i> .....	32
2.2.3	<i>Variables Dependientes</i> .....	32
2.3	MÉTODOS Y TÉCNICAS.....	32
2.3.1	<i>Obtención del andosol</i> .....	33
2.3.1.1	<i>Ubicación de la muestra</i> .....	33
2.3.1.2	<i>Método de muestreo</i> .....	33
2.3.2	<i>Análisis físico y químico del suelo</i> .....	34
2.3.2.1	<i>Calculo del pH</i> .....	34
2.3.2.2	<i>Conductividad Eléctrica</i> .....	35
2.3.2.3	<i>Carbono Orgánico Total</i> .....	37
2.3.2.4	<i>Humedad</i> .....	37
2.3.2.5	<i>Densidad real</i> .....	38
2.3.2.6	<i>Capacidad de intercambio catiónico</i> .....	40
2.3.2.7	<i>Análisis de distribución o tamaño de partícula o textura</i> .....	40
2.3.2.8	<i>Metales pesados (Cd, Ni, Pb)</i> .....	40
2.3.2.9	<i>Punto de carga Cero (PCC)</i> .....	41
2.3.3	<i>Estudio de los Factores que afectan la Adsorción de Cadmio</i> .....	42

2.3.3.1	<i>Efecto del pH</i> .....	42
2.3.3.2	<i>Efecto de la dosis del adsorbente</i> .....	44
2.3.3.3	<i>Efecto de la fuerza iónica</i> .....	45
2.3.4	<i>Estudios cinéticos y de adsorción</i> .....	46
2.3.4.1	<i>Efecto del tiempo de adsorción (cinética de adsorción)</i> .....	46
2.3.4.2	<i>Isotermas de adsorción</i> .....	47
2.3.5	<i>Estudios de desorción</i> .....	48
2.3.5.1	<i>Isotermas de desorción</i> .....	48
<b>CAPÍTULO III</b> .....		50
<b>3</b>	<b>MARCO DE DISCUSIÓN Y RESULTADOS</b> .....	50
3.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL SUELO.....	50
3.2	PUNTO DE CARGA CERO (PCC).....	52
3.3	ESTUDIO DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA ADSORCIÓN DE CADMIO.....	56
3.3.1	<i>Efecto del pH</i> .....	56
3.3.2	<i>Efecto de la dosis del adsorbente</i> .....	59
3.3.3	<i>Efecto de la fuerza iónica</i> .....	60
3.4	ESTUDIOS CINÉTICOS Y DE ADSORCIÓN.....	63
3.4.1	<i>Efecto del tiempo de adsorción (cinética de adsorción)</i> .....	63
3.4.1.1	<i>Modelo de pseudo primer orden</i> .....	64
3.4.1.2	<i>Modelo de pseudo segundo orden</i> .....	65
3.4.2	<i>Isotermas de adsorción</i> .....	67
3.4.2.1	<i>Isoterma de Freundlich</i> .....	72
3.4.2.2	<i>Isoterma de Langmuir</i> .....	73
3.5	ESTUDIOS DE DESORCIÓN.....	74
<b>CONCLUSIONES</b> .....		77
<b>RECOMENDACIONES</b> .....		79
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....		80
<b>ANEXOS</b> .....		89

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Elementos esenciales y/o tóxicos para vegetales y/o animales.....	6
Tabla 2-1: Factores que determinan la adsorción de un sistema.....	18
Tabla 3-1: tipo de sistema isotérmico según el valor $R_L$ .....	28
Tabla 1-2: Conductividad específica de las soluciones de KCl. ....	37
Tabla 1-3: Resultados del análisis físico-químico del suelo (andosol) .....	50
Tabla 2-3: Criterio de evaluación del suelo con respecto al pH.....	51
Tabla 3-3: Clasificación CIC .....	52
Tabla 4-3: Resultados del PPC en el primer ensayo .....	54
Tabla 5-3: Resultados del PPC en el segundo ensayo.....	55
Tabla 6-3: Resultados del efecto del pH sobre la adsorción .....	58
Tabla 7-3: Resultados del efecto de la dosis sobre la adsorción .....	59
Tabla 8-3: Resultados del efecto de la fuerza iónica.....	62
Tabla 9-3: Cantidad de cadmio adsorbido a través del tiempo de agitación.....	63
Tabla 10-3: Parámetros de los modelos cinéticos pseudo primer orden y pseudo segundo orden ...	67
Tabla 11-3: Adsorción de Cd en el andosol .....	69
Tabla 12-3: Valores de la isoterma de Freundlich y Langmuir para la adsorción de $Cd^{2+}$ .....	71
Tabla 13-3: Resultados de adsorción de Cd.....	73
Tabla 14-3: Parámetros de las isotermas para la adsorción de cadmio .....	74
Tabla 15-3: Niveles de correlación para el estudio del modelo .....	74
Tabla 16-3: Resultados de los experimentos de recuperación de $Cd^{2+}$ del andosol.....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Perfil de un Andosol.....	12
Figura 2-1: Proceso de andosolización en el suelo .....	13
Figura 3-1: Extensión de los Andosoles en el Ecuador.....	14
Figura 4-1: Área investigada al oeste de Santo Domingo de los Tsáchilas .....	15
Figura 5-1: Imagen MEB del alófan .....	16
Figura 1-6-1: Unidad estructural primaria de la zeolita .....	20
Figura 7-1: Tipos de Carbón activado.....	21
Figura 8-1: Tipos de isotermas de adsorción según la clasificación de la IUPAC .....	27
Figura 1-2: Recursos minerales metálicos y no metálicos de la Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas.....	31
Figura 2-2: Ubicación de la Muestra.....	33
Figura 3-2: Picnómetro .....	39
Figura 4-2: Desecador.....	39
Figura 1-3: Determinación de PPC en el primer ensayo.....	54
Figura 2-3: Determinación de PPC en el primer ensayo.....	55

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3: Determinación de PPC en el primer ensayo .....	54
Gráfico 2-3: Determinación de PPC en el primer ensayo .....	55
Gráfico 3-3: Resultados del efecto del pH sobre la adsorción de Cd.....	58
Gráfico 4-3: Resultados del efecto de la dosis sobre la adsorción de Cd.....	60
Gráfico 5-3: Resultados del efecto del electrolito soporte sobre la adsorción de Cd.....	62
Gráfico 6-3: Variación de la concentración de cadmio con respecto al tiempo de agitación .....	64
Gráfico 7-3: Modelo cinético de pseudo primer orden para la adsorción de Cadmio.....	65
Gráfico 8-3: Modelo cinético de seudo segundo orden para la adsorción de Cadmio.....	66
Gráfico 9-3: cantidad adsorbida de Cd <sup>2+</sup> vs concentración en equilibrio.....	69
Gráfico 10-3: Isoterma de Freundlich.....	72
Gráfico 11-3: Isoterma de Langmuir.....	73

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Lugar de muestreo del Andosol .....	89
ANEXO B: Toma de muestras de Andosol .....	89
ANEXO C: Reactivos .....	90
ANEXO D: Materiales y Equipos.....	91
ANEXO E: Determinación del Punto de Carga Cero (PCC) .....	94
ANEXO F: Estudio de adsorción de Cadmio .....	94
ANEXO G: Resultados de laboratorio.....	97

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>Cd</b>	Cadmio
<b>CIC</b>	Capacidad de Intercambio Catiónico
<b>h</b>	Constante de velocidad
<b>HNO<sub>3</sub></b>	Ácido Nítrico
<b>IUPAC</b>	Unión internacional de química pura y aplicada
<b>m</b>	Masa
<b>mg/L</b>	Concentración
<b>min</b>	Minutos
<b>mL</b>	Mililitros
<b>N</b>	Normalidad
<b>NaOH</b>	Hidróxido de sodio
<b>NaNO<sub>3</sub></b>	Nitrato de Sodio
<b>PCC</b>	Punto de carga Cero
<b>pH</b>	Potencial Hidrogeno
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>q</b>	Cantidad de metal adsorbida
<b>q<sub>max</sub></b>	Capacidad máxima de adsorción
<b>SNG</b>	Servicio Geológico Nacional
<b>t</b>	Tiempo
<b>TUSLMA</b>	Texto Unificado Legislación Secundaria Ministerio Ambiente
<b>V</b>	Volumen
<b>XRD</b>	Difracción de Rayos X
<b>ρ</b>	Densidad
<b>μg</b>	Microgramos

## RESUMEN

Se estudió el proceso de adsorción y desorción de  $\text{Cd}^{2+}$  sobre un suelo de origen volcánico. Se recolectó muestras del suelo proveniente de un yacimiento previamente identificado en la comunidad de San José de Achotillo en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, mediante la caracterización fisicoquímica de las muestras se determinó que el suelo no presentaba contaminación alguna. Para determinar las condiciones de la adsorción, los parámetros que se estudiaron fueron el pH, la cantidad de adsorbente, la fuerza iónica y el tiempo de agitación. Se realizó las isotermas de adsorción de cadmio para el suelo en el intervalo de 1 a 10 ppm de cadmio adicionado a partir de un estándar de cadmio de 1 000 ppm, a un pH controlado de  $10 \pm 0.1$  en 1g de andosol y a  $0.005 \text{mg.L}^{-1}$  de  $\text{NaNO}_3$  como fuerza iónica, con un tiempo de agitación de 60 min y medición de la concentración cadmio por espectrofotometría atómica y se compararon con los modelos matemáticos de Freundlich y Langmuir. Para la desorción se utilizó los residuos de los ensayos de adsorción mediante la aplicación de  $\text{NaNO}_3$  al suelo, se determinó la concentración mediante espectrofotometría. El suelo registra la presencia de cadmio desde 0,0223 ppm hasta 0,5341 ppm con una adsorción desde 94,6% hasta 98,6%. Los resultados mostraron que el modelo de Langmuir es el que mejor describe la adsorción y se determina que el proceso se realiza sobre una monocapa. El porcentaje de desorción varía de 9,55% a 20,99% de recuperación de cadmio lo que indica que se encuentra fuertemente retenido en el suelo. Se concluye el suelo posee una gran capacidad de adsorción, por lo que podría ser utilizado para procesos de eliminación de cadmio en aguas contaminadas. Se recomienda ampliar el estudio de la adsorción del andosol con soluciones que contengan diferentes contaminantes simultáneamente.

### *Palabras clave*

<TECNOLOGIA Y CIENCIAS DE LA INGENIERIA>, <ING. QUIMICA>, <ISOTERMAS DE ADSORCIÓN>, <DESORCIÓN>, <CADMIO (METAL)>, <LANGMUIR (ECUACION)>, <FREUNDLICH (ECUACION)>, <ANDOSOL (SUELO)>, <CINETICA DE ADSORCIÓN >

## **ABSTRACT**

It was studied the adsorption and desorption process of cadmium ( $\text{Cd}^{2+}$ ) on a soil of volcanic origin. Some collected samples of soil from San José de Achotillo at Santo Domingo de los Tsáchilas Province, through the physicochemical characterization of them examples it is determined that the soil not presented any pollution. To determine the adsorption conditions, parameters that were studied were pH, amount of adsorbent, ionic strength and mixing time. Isotherms of cadmium adsorption to the soil was in the range from 1 to 10 parts per million (ppm) of cadmium by adding standard from 1000 ppm cadmium, to a controlled pH of  $10 \pm 0,1$  in 1 g of andosol and  $0.005 \text{ mg.L}^{-1}$   $\text{NaNO}_3$  as ionic strength, with a time of 60 minutes mixing and concentration of cadmium measurement by Atomic spectrophotometry and it was compared with models mathematicians of Freundlich and Langmuir. For the desorption were used waste of trials adsorption on the soil by the application  $\text{NaNO}_3$ , and it was determined the concentration by spectrophotometry. Soil records the presence of cadmium from 0,0223 ppm to 0,5341 ppm whit an adsorption an adsorption from 94,6% to 98,6%. The results showed that the model of Langmuir is which best describe the adsorption and it is determined that the process is performed on a monolayer. The percentage of desorption of varies from 9,55% to 20,99% of cadmium recovery which indicates that it is strongly retained in the soil. It is concluded the soil has a high adsorption capacity, so it could be used for processes of elimination of cadmium in contaminated waters. It is recommended to extend the study of andosol adsorption with solutions containing different pollutants simultaneously.

### **Key Words:**

TECHNOLOGY AND SCIENCE ENGINEERING, CHEMISTRY ENGINEERING, ISOTHERMS OF ADSORPTION, DESORPTION, CADMIUM (METAL), LANGMUIR (EQUATION), FREUNDLICH (EQUATION), ANDOSOL (SOIL), KINETICS ADSORPTION.

## INTRODUCCIÓN

La mayoría de corrientes superficiales de agua están siendo utilizadas como reservorio de aguas residuales en diferentes campos de la actividad humana, sin recibir un adecuado tratamiento, limitando su uso para diferentes propósitos, lo cual implica un impacto económico importante ya que son necesarios métodos y sistemas de tratamiento muy elaborados y costosos para recuperar el nivel de calidad deseado.

Las aguas residuales que se descargan como producto de la actividad industrial contienen grandes cantidades de metales pesados. Las curtiembres son un ejemplo de industrias con alto potencial de impacto ambiental. Esto es consecuencia principalmente del uso de compuestos químicos para el curtido, solventes, pigmentos, etc. Los impactos incluyen efectos sobre las aguas donde se descargan los efluentes afectando a la vida acuática por la disminución de oxígeno disuelto, también disminuyen el valor de uso como agua para consumo humano o para la agricultura por la acumulación de metales pesados.

En Ecuador las curtiembres se consideran como una de las industrias más contaminantes de agua del país ya que la mayoría de las curtiembres descargan sus aguas residuales a los ríos sin un tratamiento previo. Un ejemplo de esto es la ciudad de Ambato que según el estudio de control de calidad ambiental y planificación urbana de Ambato (Tayupanda 2010), se arrojan 1 925 m<sup>3</sup> de aguas residuales al día por parte de las curtiembres.

Otra industria que también es una fuente de contaminación de los ríos es la minería debido al drenaje ácido que se forma como resultado de los metales pesados de los minerales que son desechados directamente a los ríos (Movimiento Mundial por los Bosques Tropicales 2004). El material tóxico ácido puede contaminar cuerpos de agua durante cientos o incluso miles de años.

Las partículas con metales pesados al separarse de los residuos mineros, se diseminan con el viento depositándose en el suelo y en los lechos de los cursos de agua y se integran lentamente en los tejidos de organismos vivos como los peces (Movimiento Mundial por los Bosques Tropicales 2004).

En Latinoamérica la minería a cielo abierto es una de las técnicas más practicadas por las industrias mineras lo que han ocasionado situaciones problemáticas, a más de devastar toda el área donde se

ubican removiendo miles de toneladas de tierra y piedra para extraer los minerales, utilizan grandes cantidades de agua para su funcionamiento y vierten sus desechos a las corrientes de agua cercanas a los yacimientos sin un previo tratamiento; causando daños a la salud de las comunidades aledañas que por lo general son comunidades rurales que utilizan el agua para consumo y para la agricultura.

En Latinoamérica la minería a cielo abierto es una de las técnicas más practicadas por las industrias mineras lo que han ocasionado situaciones problemáticas, a más de devastar toda el área donde se ubican removiendo miles de toneladas de tierra y piedra para extraer los minerales, utilizan grandes cantidades de agua para su funcionamiento y vierten sus desechos a las corrientes de agua cercanas a los yacimientos sin un previo tratamiento; causando daños a la salud de las comunidades aledañas que por lo general son comunidades rurales que utilizan el agua para consumo y para la agricultura.

En cualquier parte del mundo la minería siempre va a ser fuente de contaminación de los ríos por metales pesados porque siempre se van a utilizar los mismos procesos para la extracción de los minerales.

### **Antecedentes**

A nivel mundial varios son el estudios sobre andosoles y alofán por ejemplo como adsorbente de Cu y Zn, (Pérez, et al, 1980), de compuestos orgánicos (Espinoza et al., 2009; (Woignier al., 2012; Woignier et al., 2012) de aniones (Ishiguro y Makino, 2011; D'Alessandro et al, 2012), así como de otros temas (Armas et al., 2013). En Latinoamérica también se han realizado estudios en varios países sobre caracterización, adsorción y otros temas (Landaeta et al, 1978), (Cabeza et al., 2005; Sandoval et al., 2008; Flores y Parra , 2010; Alvarado et al.,2014)

Son muy pocas las investigaciones de este tipo de suelos realizadas en Ecuador y las que se han realizado han estado orientadas más bien al área agrícola (Espinoza 2010) y al área de la pedogénesis (Zehetner et al., 2003; Buytaert et al., 2007), son aún más pocas las investigaciones en específico del yacimiento ubicado en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, que es un yacimiento que tiene un alto contenido de alofán (Kaufhold et al., 2009; Kaufhold et al., 2010)

Estos eventos comienzan en el año 1987 con el descubrimiento del yacimiento, evento ocurrido durante un proyecto de cooperación técnica Ecuador-Alemania, seguido por las pruebas fallidas para elaboración de ladrillos en 1988 - 1992, debido a que este tipo de suelos tienen una alta

capacidad de adsorción de agua, lo cual provocaba la fisura de estos ladrillos, posteriormente en el año 2000 se realizaron algunas prospecciones y en el año 2003 la toma de muestras para pruebas industriales. En los años 2009-2010 se ha realizado la caracterización y cuantificación del yacimiento por parte del SGN, Servicio Geológico Nacional hoy INNIGEM, y también en el año 2010 se realizó un estudio sobre la remoción de fluoruro de agua (Kaufhold et al., 2010, p.25-33)

Las potencialidades del alofán principal constituyente del yacimiento de Santo Domingo de los Tsáchilas son muchas, por lo que es de gran importancia la investigación que se pueda realizar sobre el mismo con diferentes enfoques.

La falta de información de este yacimiento ubicado en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas frena de alguna manera estudios de posibles aplicaciones de este yacimiento, por ello los datos que se recaben en la presente investigación serán de gran utilidad para poder generar información que pueden servir como base para diferentes investigaciones que puedan realizar posteriormente instituciones públicas o privadas.

### **Justificación**

Con la finalidad de generar información básica que permita en un futuro encontrar alternativas para la descontaminación de los cuerpos de agua, se plantea la presente investigación, con el propósito de evaluar el potencial de adsorción de metales pesados que tienen los suelos de origen volcánico.

A nivel mundial son diversos los estudios que se realizan sobre suelos de origen volcánico, sobre alofán natural y sobre alofán sintético, tanto de sus propiedades así como de sus posibles aplicaciones en diferentes áreas, llegando incluso a emitir patentes para el caso del alofán sintético.

Esta investigación pretende determinar la capacidad de la adsorción de cadmio por un andosol y determinar su posible aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados.

La viabilidad para la ejecución del proyecto es favorable, existen vías de acceso adecuadas para llegar al punto donde se encuentra el andosol, se tiene todo el apoyo para realizar las diversas actividades dentro del laboratorio además se cuenta con los materiales y técnicas para realizar la investigación.

## **Objetivo**

### **Objetivo General**

- Estudiar el proceso de adsorción y desorción de  $\text{Cd}^{2+}$  sobre un suelo de origen volcánico (andosol) de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas.

### **Objetivos Específicos**

- Determinar las características físicas y químicas generales del andosol recolectado.
- Determinar las condiciones óptimas para obtener una máxima capacidad de adsorción
- Realizar cinéticas y experimentos de adsorción y desorción en función de las condiciones óptimas.
- Interpretar los datos obtenidos en los experimentos de adsorción y desorción mediante la aplicación de modelos cinéticos y modelos de isothermas de adsorción y desorción.

## CAPITULO I

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1 Contaminación del agua

Ocurre cuando se descarga de forma directa o indirecta los contaminantes sobre cuerpos de agua sin tratamiento previo que remueva los compuestos que están ocasionando la contaminación. La característica principal de la contaminación en el agua se ve denotada por la presencia de sustancias orgánicas e inorgánicas como ácidos, solventes orgánicos, pinturas, metales y demás, derivados de actividades industriales, agrícolas, ganaderas, domésticas, dicha agua ya no es apta para el consumo humano.

##### *1.1.1 Contaminación de Aguas con Tóxicos Persistentes*

El creciente desarrollo industrial en la actualidad ha provocado un enorme aumento en la dependencia de los recursos hídricos dando como resultado aguas residuales con altas cargas de contaminantes tóxicos y persistentes esta es una de las principales amenazas para alterar la calidad del agua. El primer desafío consiste en identificar estas sustancias químicas que pueden ser perjudiciales tanto para las aguas dulces superficiales, subterráneas, como aguas marinas y que requieren un control dificultado por la cantidad limitada de información disponible. La contaminación procedente de sustancias químicas tales como metales pesados, disolventes, colorantes, plaguicidas etc. Estas sustancias químicas llegan a alcanzar el medio acuático de diversas formas, pueden ser directamente vertidas como efluentes de una industria o procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) que no cumplen adecuadamente con los tratamientos.

## 1.2 Metales Pesados

Los metales pesados son aquellos elementos metálicos de la tabla periódica que tiene un peso atómico mayor a 55.85 g/mol. Los metales pesados se encuentra en el ambiente en bajas concentraciones incluso algunos de ellos son esenciales para el desarrollo de plantas y animales (incluyendo al hombre), cuando se encuentran en altos niveles de concentración llegan a ser tóxicos.

**Tabla 1-1:** Elementos esenciales y/o tóxicos para vegetales y/o animales

Metal	Esencial		Toxico		Forma dominante en el ambiente
	Vegetal	Animal	Vegetal	Animal	
As	NO	NO	SI	SI	AsO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>
Cd	NO	NO	SI	SI	Cd <sup>2+</sup>
Cr	NO	SI	NO	NO	CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Cu	SI	SI	SI	SI	Cu <sup>2+</sup>
Hg	NO	NO	SI	SI	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Hg
Mo	SI	SI	SI	SI	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Ni	SI	SI	SI	NO	Ni <sup>2+</sup>
Pb	NO	NO	SI	SI	Pb <sup>2+</sup>
Se	NO	NO	SI	SI	SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Zn	SI	SI	SI	SI	Zn <sup>2+</sup>
Co	SI	SI	NO	NO	Co <sup>2+</sup>
Sn	NO	NO	NO	SI	Sn <sup>4+</sup>

Fuente: (BOIXADERA y TEIRA 2001; citado en Realpe, 2009 )

Realizado por: Moyano Diego, 2016

En la naturaleza, los elementos metálicos se encuentran en varias formas de oxidación: compuestos inorgánicos convencionales, como las sales iónicas simples, complejos metálicos o compuestos de coordinación y compuestos organometálicos. Los átomos que forman los compuestos metálicos pueden estar unidos por enlaces iónicos, covalentes y por enlaces que poseen un carácter intermedio. Cuando se disuelven en agua, muchos compuestos metálicos se disocian en iones, comportándose a menudo como cationes, aunque, en ocasiones, pueden ser oxoaniones. Pueden formar también compuestos con otros metales. (Flores, 2008, p.1007-1009)

### *1.2.1 Contaminación por metales pesados*

La exposición a los elementos metálicos, así como la contaminación del ambiente, se puede dar por factores naturales (erosión de minerales metálicos), o por las actividades humanas (minería, fundiciones, combustión del petróleo y de sus múltiples derivados, y aplicaciones industriales de los metales). Esto se origina a causa de los vertidos con altos niveles de concentración de elementos traza que se generan como subproducto de las actividades industriales como la minería e industria agrícola principalmente. (Romero y Galán, 2008, p. 48-60).

Debido al aumento del uso industrial y comercial de los metales, se ha incrementado considerablemente las descargas de metales al medio ambiente y constituyen un serio problema ambiental debido a su toxicidad y a sus repercusiones fisiológicas tanto en los seres humanos como en los animales.

Las vías de ingreso de los metales hacia el cuerpo humano son la respiratoria, la digestiva y, en menor grado, la dérmica. Los metales pesados tienen la característica de unirse a moléculas orgánicas y ser parte de la cadena alimenticia de los seres vivos. Al no ser biodegradables tienden a bioacumularse debido a que el organismo afectado no puede eliminar el contaminante, haciendo que la concentración en el medio donde vive cada vez sea mayor. (Morales y Ruiz, 2008, p. 3)

Cuando el metal que se encuentra en un órgano alcanza una concentración crítica en sus células provoca cambios funcionales lesivos, que pueden llegar a ser reversibles o irreversibles. La concentración crítica en un órgano es la concentración media alcanzada en un órgano, capaz de afectar un número suficientemente grande de sus células más sensibles. Identificar al órgano que primero alcance una concentración crítica en unas circunstancias determinadas de exposición ayuda a detectar el comienzo de una intoxicación, convirtiéndose en una forma de alarma para prevenir efectos más graves. (Contreras et al., 2004, p. 32-34).

### 1.3 Cadmio (Cd)

El cadmio es un elemento químico de número atómico 48; peso atómico de 112.40 uma y densidad relativa de 8.65 a 20°C (68 °F), valencia química 2. Su punto de fusión de 320.9°C (610 °F) y de ebullición de 765°C (1410 °F). Es un metal dúctil, de color blanco argentino con un ligero matiz azulado.

El cadmio se produce de forma natural en el medio ambiente mediante el proceso gradual de la erosión y la abrasión de rocas y suelos, y desde los eventos singulares como los incendios forestales y erupciones volcánicas. Por lo tanto, es naturalmente presente en todas partes en el aire, el agua, los suelos y los productos alimenticios.

Es un metal que se encuentra en la naturaleza combinado con otros elementos como el oxígeno, cloro o azufre, es altamente tóxico incluso en bajas concentraciones, el cadmio y los compuestos de cadmio son considerados cancerígenos, la contaminación por cadmio en el agua se produce por vertidos industriales y urbanos.

El Cadmio es fuertemente adsorbido por parte de las plantas, lo que supone un daño potencial para los animales que dependen de éstas para sobrevivir.

Cuando el cadmio se encuentra en el agua puede bioacumularse en algunas especies de crustáceos y peces. (Eissa et al., 2003, p. 56-62).

#### 1.3.1 *El Cadmio en el medio ambiente*

El cadmio no se degrada en el ambiente, pero sí cambia de forma, las partículas de cadmio en el aire pueden movilizarse largas distancias antes de depositarse en la tierra o el agua. Algunas formas de cadmio se disuelven en agua. El cadmio se adhiere fuertemente a partículas del suelo. Las plantas, los peces y otros animales incorporan cadmio del ambiente

El cadmio es liberado como subproducto de la refinación del zinc, el cual después es lixiviado y arrastrado por desbordes de los diques de cola, como agua acida hacia los desagües naturales, que finalmente terminarán en el mar.

A través de ríos y arroyos, es transportado tanto disuelto en el agua como parte de sedimentos en suspensión sien estas las que tienen el mayor potencial para producir los efectos dañinos más grandes. Estas soluciones se depositan finalmente como sedimentos en los lechos de los ríos o se filtran hasta las aguas subterráneas, contaminando, como consecuencia, las napas inferiores de agua, especialmente para alimentar perforaciones, donde la extensión de la contaminación dependerá de la cercanía de la perforación del lugar de ubicación de la mina. (Duruibe et al., 2007, p.112-113)

### *1.3.2 Fuentes del cadmio*

El mineral de cadmio más conocido es greenockite, sulfuro de cadmio (Cd 77,6%). Otros minerales son otavita, carbonato de cadmio (Cd 61,5%) y óxido de cadmio puro (87,5% Cd). Greenockite (CdS) se asocia casi siempre con esfalerita (ZnS). Como consecuencia, el cadmio se produce principalmente como un subproducto de la minería, fundición, y el refinado de minerales de sulfuro de zinc.

El cadmio es uno de los metales pesados, que es altamente tóxico para los humanos, las plantas y los animales. La principal vía por la cual entra el cadmio medio ambiente es a través de residuos de procesos industriales tales como galvanoplastia, fundición, fabricación de aleación, pigmentos, plásticos, baterías de cadmio-níquel, fertilizantes, pesticidas, minería, pigmentos y colorantes, las operaciones textiles y refinación.

Varios organismos reguladores han establecido los límites máximos para la descarga de metales pesados tóxicos en los sistemas acuáticos. De acuerdo con la recomendación de la OMS Cd (II) límite en el agua es de 0.005 mg / L. (Rao et al., 2010, p. 81-103)

### *1.3.3 Efectos en la salud*

Las fuentes primarias de exposición de Cd para la población en general incluyen alimentos y el tabaco de fumar. Las mayores concentraciones de Cd (10-100 ppm) se encuentran en los órganos internos de los mamíferos, principalmente en los riñones y el hígado, así como en algunas especies de peces, mejillones y ostras, especialmente cuando se ven atrapados en mares contaminados. En la industria, la exposición Cd se da principalmente por inhalación, también pueden ser ingeridos a través de manos contaminadas.

El cadmio entra en la alimentación humana con los vegetales y productos animales. Se fija a las plantas más rápidamente que el plomo. Los frutos y semillas contienen menos cadmio que las hojas. El pescado, los crustáceos, el riñón e hígado de animales acumulan cadmio en grado relativamente elevado. (Ramírez, 2002, p. 52)

La concentración de cadmio en el organismo aumenta a lo largo de la vida, desde 1 ug en el recién nacido hasta 10-30 ug en el adulto; naturalmente, estas cifras varían según el grado de exposición ambiental.

La *intoxicación aguda* por vía inhalatoria consiste en una neumonitis química, con disnea, debilidad, fiebre e insuficiencia respiratoria, que puede llegar al edema agudo de pulmón. Por vía digestiva produce náuseas, vómitos, dolor abdominal, diarrea y shock.

La *intoxicación crónica* afecta sobre todo el riñón y si la vía de entrada es inhalatoria, también el pulmón. Aparece primero una lesión del túbulo proximal, con proteinuria consistente en 2-microglobulina y luego afectación glomerular; la concentración crítica de cadmio es de 200 ug/kg. En el pulmón aparecen lentamente fibrosis, enfisema e insuficiencia pulmonar. El cadmio altera la absorción de hierro, lo que puede originar anemia. (Bernard, 2008, p. 557-564)

La absorción por vía oral varía alrededor del 5 por ciento, pero se puede aumentar hasta un 15 por ciento en sujetos con bajas reservas de hierro. Cuando la exposición es por inhalación, se estima que entre 10 y 50 por ciento de Cd es absorbida, en función del tamaño de partículas y la solubilidad de compuestos de Cd. En el caso de Cd en el humo del tabaco, un promedio de 10 por ciento de Cd se absorbe.

El cadmio puede acumularse en el cuerpo humano, especialmente en el riñón, pues su eliminación es muy lenta y puede provocar afecciones renales, alteraciones óseas y fallos del aparato reproductor. No puede descartarse que actúe como carcinógeno. Aproximadamente se absorbe un 5% del cadmio presente en los alimentos. Este porcentaje puede alcanzar el 15% si hay deficiencia de hierro. En riñón puede concentrarse hasta el 85% de la carga corporal de cadmio. Se considera que el riñón es el órgano diana crítico tanto en la población general como en poblaciones expuestas.

La absorción de cadmio por los animales es baja, particularmente en rumiantes, donde los porcentajes de absorción no sobrepasan el 1%, pero la retención en el organismo es muy elevada,

particularmente en los riñones, donde la vida media puede ser de varios años en rumiantes. En animales de abasto donde el tiempo de crianza es muy reducido, particularmente en monogástricos, las acumulaciones de cadmio serán muy reducidas con prácticas normales de manejo. (Ramírez, 2002, p.53).

#### **1.4 Andosol**

Son suelos que se forman sobre cenizas y materiales piroclásticos expulsados a través de las erupciones volcánicas o en materiales con altos contenidos de silicatos, (alofán, imogolita y halloysita) los andosoles se pueden desarrollar en casi cualquier clima (excepto bajo condiciones climáticas hiperáridas), sin embargo las condiciones climáticas en las que se encuentre van a ser factores que influyan directamente en la meteorización de los materiales sobre los que se desarrolla el andosol (IUSS, 2007, p. 70).

El perfil de un andosol contiene un horizonte ándico rico en minerales no cristalinos producidos por la meteorización de los materiales volcánicos, contienen una elevada concentración de sílice que se caracteriza por ser de colores oscuros. La composición de los andosoles varía según la edad del suelo, pH, humedad, contenido de materia orgánica, cantidad de cenizas y composición del material parental, también tienen un buen drenaje que los hace resistentes a la erosión. (Chesworth, 2008, p. 39-40).

La morfología de los Andosoles se caracteriza por la deposición de materiales originales, con los materiales más pequeños en la parte superior, de manera gradual o varias veces de ser enterrado bajo nuevos materiales vítricos frescos. Los Andosoles son por lo general suelos oscuros ricos en materia orgánica, pero varía considerablemente de acuerdo con el tipo de andosol. El color también está determinada en parte por la naturaleza de los materiales de tefra, que van desde basalto negro de materiales riolíticas de color claro.

El Andosol presenta un horizonte que sigue una secuencia A-Bw-C, el horizonte A suele ser muy oscuro que va desde 20 a 50 cm, la cantidad de materia orgánica es alrededor del 8%, aunque los perfiles más oscuros pueden contener hasta un 30%, la estructura del horizonte B es por lo general muy poco desarrollada y difícil de identificar. (Chesworth, 2008, p. 42)

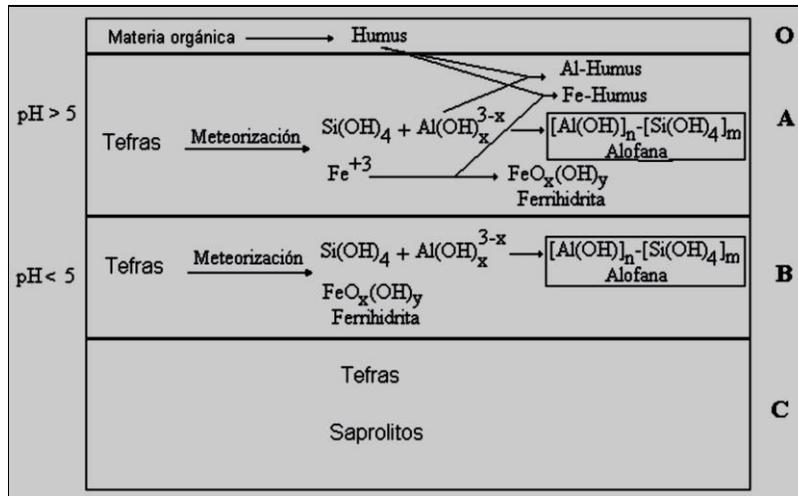


**Figura 1-1:** Perfil de un Andosol

Fuente: Moyano Diego, 2016

Estos suelos se caracterizan por tener una alta capacidad de retención de agua la cual es atribuida principalmente a su alta porosidad y al elevado contenido de materia orgánica, otras características que posee este tipo de suelo es la baja densidad aparente (0,27 – 0,94), bajo pH en agua (4 – 5,1)

La naturaleza de los materiales de origen y el clima, lo que influye en la tasa de meteorización y por lo tanto la liberación de Al, Fe y Si, son los factores dominantes que determinan la formación de Andosoles. El proceso de formación de los Andosoles, se lo conoce como andosolización, consiste en el rápido desgaste de la tefra volcánica (material volcánico expulsado durante las erupciones volcánicas presentes en el aire, independientemente de la morfología, tamaño y composición) y la producción de un alto contenido de materiales no cristalinos. (Chesworth, 2008, p. 46). Este proceso que implica la formación de complejos de Al-humus (Sadao, 1993, p. 93)



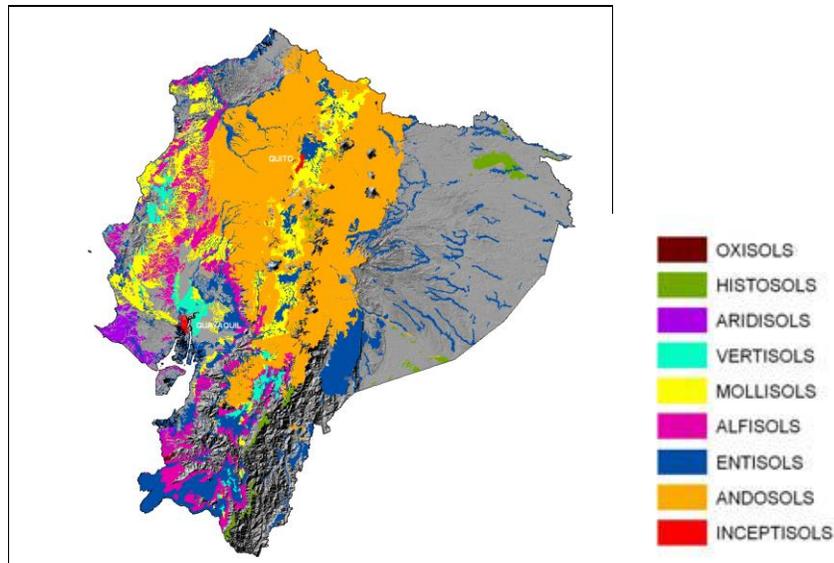
**Figura 2-1:** Proceso de andosolización en el suelo

Fuente: (Zapata, 2006).

Los andosoles presentan una mineralogía dominante de arcillas alofánicas amorfas y con una alta fijación de fósforo aproximadamente hasta el 95%, constituyéndose en su principal limitante por lo que se disminuye rápidamente la disponibilidad de los fosfatos solubles añadidos, considerándose que sólo aproximadamente un 10% del fósforo aplicado es utilizado por las plantas, el 90% restante de todo el fósforo que entra al suelo tiende a combinarse con muchos constituyentes diversos del suelo para formar compuestos insolubles. (IUSS, 2007, p. 72).

La Ferrihidrita es un mineral de  $Fe^{3+}$  mal ordenado, que consiste en partículas esféricas bien agregados que a menudo aparecen con la estructura similar a un gel, es muy común en Andosoles especialmente cuando los materiales son ricos en hierro. Este mineral tiene una gran área superficial y una capacidad de intercambio de cationes y de aniones dependiente del pH (Biggam et al., 2002, p.156)

Los andosoles representan un porcentaje significativo de la superficie total del país y están distribuidos en lo que constituye principalmente la región de la Sierra central, occidental y parte de la región oriental. El Ecuador al estar ubicado en una zona de actividad volcánica ha permitido que este tipo de suelos sea uno de los más abundantes en el país, datos publicados en el 2010 indican que este tipo de suelos cubren un área aproximada de 60 593 km<sup>2</sup> del territorio ecuatoriano (CLIRSEN 2010), la mayor concentración de andosol se encuentra en la cordillera noroccidental y parte de la costa específicamente en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, Pichincha y Esmeraldas.

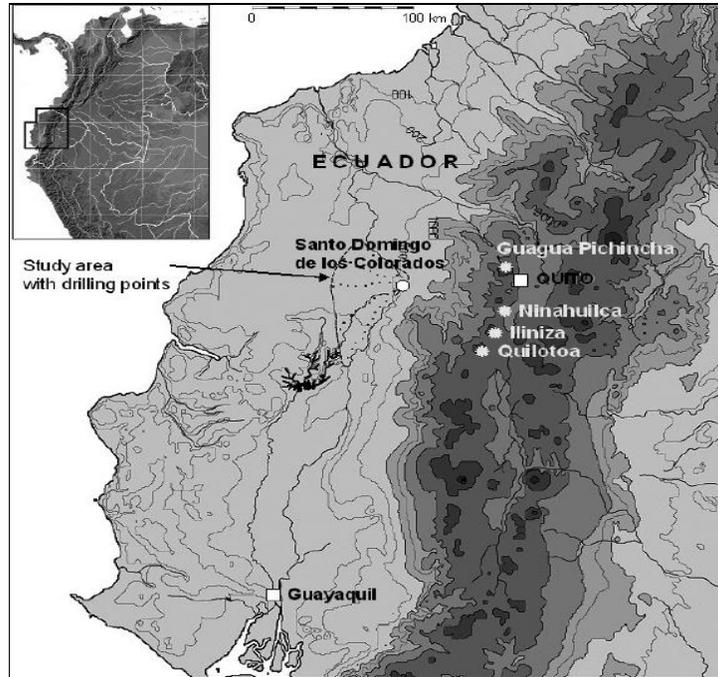


**Figura 3-1:** Extensión de los Andosoles en el Ecuador  
**Fuente:** (ARTIEDA 2010)

## 1.5 Alofán

El alofán es un aluminio silicato no cristalino que raramente se encuentra en grandes cantidades en el suelo, especialmente en los formados de materiales volcánicos, no tiene una composición definida, pero presenta una relación atómica Al/Si entre 1 y 2, en base a esto, la naturaleza del alofán puede ser rico en aluminio y rico en silicio. El alofán es un componente de la fracción coloidal de los suelos derivados de cenizas volcánicas recientes y se ha observado que tiene influencia sobre las propiedades físicas de éstos, son partículas que tienen carga negativa variable y presentar características anfóteras que se hallan. (Ágeles, 2010, p. 10- 15)

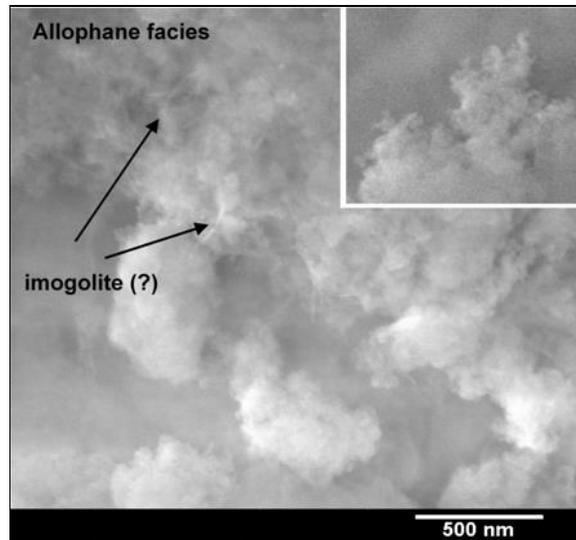
A finales de 1980, DINAGE (conocido hoy como el SGN, Servicio Geológico Nacional) y el Instituto Federal Alemán de Geociencias y Recursos Naturales exploraron materia prima para la construcción de ladrillos en la zona de Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador, durante esta campaña se encontró un depósito de arcilla alofán rico que no era adecuado para la producción de ladrillos. Investigaciones mineralógicas detalladas indican una alta proporción de alofán en este yacimiento que cubre aproximadamente 4.000 km<sup>2</sup> de superficie el contenido de alofán es alto, 60 a 80 % (Kaufhold et al., 2009, p.73-80).



**Figura 4-1:** Área investigada al oeste de Santo Domingo de los Tsáchilas  
 Fuente: (Kaufhold et al., 2009, p.73)

El tamaño de partícula del alofán oscila entre 3 y 5 nm con una gran área de la cara específica, se acompaña habitualmente variando cantidades de imogolita, cuando se producen en cantidades apreciables, se pueden detectar por difracción de Rayos X (XRD). En el caso de la alofán ecuatoriano, la cantidad de presente imogolita estaba por debajo de la detección límite de XRD. Unas pocas fibras, supuestamente, de imogolita se observaron usando SEM.

La gran superficie específica y la microestructura tortuosa de alofán se cree que confieren su capacidad excepcional de nutrientes de valores, para inmovilizar los contaminantes y para estabilizar la materia orgánica. (Woignier et al., 2014, 532-535)



**Figura 5-1:** Imagen MEB del alofán  
Fuente: Kaufhold et al., 2009, p.75)

Estudios anteriores han demostrado que alofán contribuye a los grandes contenidos de materia orgánica de tales suelos, posiblemente reduciendo la facturación de carbono orgánico. Estos minerales tienen un área de superficie muy grande y una alta carga negativa que es dependiente del pH. Además, el alofán tiene considerables propiedades de intercambio al variar sus cargas de acuerdo a la reacción del medio, es decir, que a pH ácido adquiere fuertes cargas positivas por lo tanto atrae aniones; en cambio en suelos con pH alcalino desarrollan elevadas cargas, teniendo la capacidad de atraer cationes. ( Saltos Moncayo 1990)

Según (Fieldes y Perrot, 1960, p. 625) señala que el origen del fenómeno de la carga variable que presenta el alofán puede deberse a la posición tetraédrica (coordinación 4) que toma el Al. La materia orgánica que está presente en los suelos volcánicos también interviene como fuente de la Capacidad de Intercambio Catiónico.

## 1.6 Área Superficial

Área de superficial determina en gran medida muchas de las propiedades físicas y químicas de los materiales. La adsorción física de las moléculas, la pérdida o ganancia de calor como consecuencia de que la adsorción, expansión y contracción, y muchos otros procesos físicos y químicos están estrechamente relacionados con el área de la superficie.

El propósito de las mediciones del área de superficie es comúnmente para determinar la accesibilidad de las superficies internas del complejo mineral de arcilla a las moléculas o iones que pueden ser adsorbidos sobre la misma. Esta accesibilidad se determina generalmente por las fuerzas de adsorción relativas de las moléculas introducidas o iones a las superficies minerales de arcilla en comparación con las fuerzas de atracción entre las plaquetas de mineral de arcilla adyacentes. Los sistemas de mayor interés general son sistemas hidratados.

En consecuencia, se desea comúnmente un procedimiento de medición que estima el área de superficie que sea accesible en condiciones hidratadas. Los suelos varían ampliamente en su superficie reactiva debido a las diferencias en la composición mineralógica y orgánica y en su distribución de tamaño de partícula. La retención de agua y el movimiento, capacidad de intercambio catiónico, y la adsorción de plaguicidas están estrechamente relacionados con la superficie específica. (Carter et al., 1986, p.667).

### **1.7 Capacidad de intercambio catiónico**

Es un proceso físico-químico, por el cual partículas sólidas del suelo adsorben cationes de la fase acuosa en cantidades equivalentes. La CIC dependerá del contenido y tipo de minerales de arcillas y de compuestos orgánicos presentes en el suelo, si el suelo es muy meteorizado y tiene un bajo contenido de materia orgánica el valor del CIC es bajo. En cambio si el suelo es menos meteorizado y con alto contenido de materia orgánica, los valores de CIC pueden ser notablemente altos. Esta capacidad de retener e intercambiar cationes es un indicador directo de la fertilidad de los suelos (Henríquez et al., 2005, p. 59-60)

### **1.8 Adsorción**

Es una técnica de separación en la cual las moléculas o iones de una fase líquida o gaseosa llamada adsorbato se adhieren sobre la superficie de un sólido (adsorbente), es muy utilizada para la eliminación de contaminantes en medios acuáticos (Martin 1990).

**Tabla 2-1:** Factores que determinan la adsorción de un sistema

Propiedades del solido	Naturaleza del adsorbato	Características de la fase líquida	Competencia entre adsorbatos	
Superficie específica. La adsorción es un fenómeno superficial, y como tal, cuanto mayor sea la superficie del adsorbente, mayor será la adsorción. (Martin 1990)	Solubilidad del adsorbible en el disolvente: cuanto mayor es la solubilidad, menor será la adsorción.	pH. El pH no solo determinará la concentración de iones hidronio e hidroxilo en el medio, sino que también condicionará el grado de disociación del adsorbible.	La presencia de múltiples adsorbibles puede influir tanto en la capacidad de adsorción como en la velocidad del proceso global.	
Distribución del tamaño de poro. Es un factor importante ya que determinará la superficie accesible para la adsorción. (Martin 1990)	Estructura del adsorbato: la presencia de grupos funcionales favorece las interacciones entre el soluto y el sólido, dando lugar a una adsorción específica.	Temperatura. Aumentos en la temperatura desfavorecen los procesos de adsorción; sin embargo, se encuentran ejemplos de lo contrario, sobre todo en fase líquida.		Naturaleza química del disolvente. Determinará en gran parte la afinidad del sólido por el disolvente y por el adsorbible.
Tamaño de partícula del adsorbente.	Tamaño molecular del adsorbato. No sólo determina la velocidad de adsorción, sino también la capacidad de la misma ya que pueden surgir impedimentos estéricos que impidan la entrada de la molécula de adsorbible en determinados poros	Naturaleza del disolvente		<p>Tensión superficial. Los adsorbatos que disminuyen la tensión superficial tienden a desplazarse hacia la zona superficial, favoreciéndose de este modo la adsorción. Además determinará el grado de contacto sólido-líquido. Son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensión superficial positiva: predominan las fuerzas de cohesión líquido-líquido sobre las de atracción líquido-sólido.</li> <li>• Tensión superficial compensada: igualdad entre las fuerzas de cohesión y las de atracción.</li> <li>• Tensión superficial negativa: predominan las fuerzas de adhesión.</li> </ul>

Fuente: (Mestanza 2012)

Hay dos tipos de adsorción, eso depende de las fuerzas de atracción entre los componentes de la fase líquida y la superficie del sólido.

#### *1.8.1 Adsorción Física*

En la adsorción física intervienen las fuerzas de Van der Waals las cuales originan un enlace débil que une al adsorbente con el adsorbato, por lo tanto es posible regenerar el adsorbente. A medida que aumenta la cantidad adsorbida, el adsorbato se ordena en capas sucesivas (multicapas). A este tipo de adsorción se la conoce como fisisorción.

#### *1.8.2 Adsorción Química*

La quimisorción se da cuando el enlace que une el adsorbente entre el adsorbato es bastante fuerte, es un proceso lento e irreversible, las energías de adsorción son mayores que los de la fisisorción, el adsorbato se ordena en una sola capa (Paredes, 2011, p. 12).

#### *1.8.3 Tipos de Adsorbentes*

Existe una gran variedad de materiales que pueden ser utilizados como adsorbentes, pueden ser naturales como tierras arcillosas y zeolitas o artificiales como el carbón activado, gel de sílice y alúmina que son los más utilizados debido a que estos presentan una gran porosidad. También es posible utilizar biomasa para el tratamiento de efluentes contaminados con metales pesados.

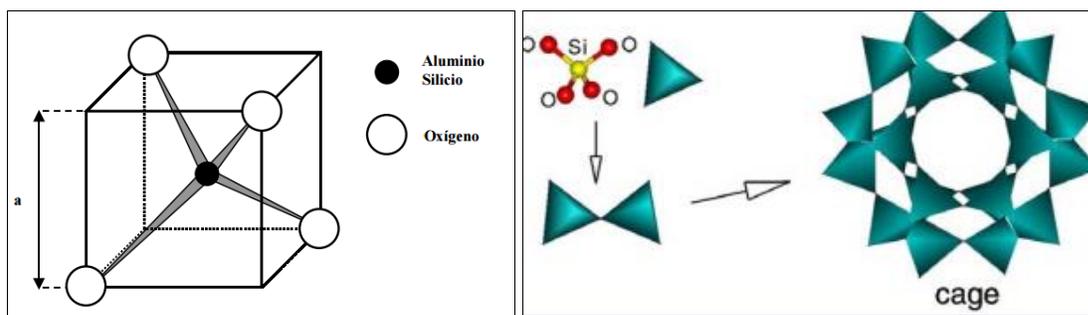
##### *1.8.3.1 Arcillas*

La capacidad de adsorción en las arcillas está relacionada con las características texturales y de la carga negativa en su estructura de finos granos de silicato. La adsorción de agua de arcillas adsorbentes es mayor del 100% con respecto al peso presentan un tamaño reducido de partícula, y presencia de carga en su superficie, con características físico - químicas muy particulares: retención y liberación de moléculas orgánicas e inorgánicas. El proceso de adsorción de metales se basa en el intercambio iónico similar al de las zeolitas. La

capacidad para mantenerse dispersas o reunirse en agregados voluminosos es un problema para su uso en columnas. (Lazo et al., 2007, p. 167)

### 1.8.3.2 Zeolita

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos microporosos constituidos principalmente por átomos de Si y Al unidos enlazados por átomos de oxígeno originando esqueletos tetraédricos de  $(\text{SiO}_4)^-$  y  $(\text{AlO}_4)^-$ , está conformado por una red de cavidades o canales de distinto tamaño, en las que se alojan cationes y moléculas de agua, Cada átomo de aluminio que sustituye isomórficamente a uno de silicio proporciona una carga negativa, la cual se neutraliza con las cargas positivas que aportan los cationes, sin cambios importantes en su estructura cristalina. (Covian, 1991)



**Figura 1-6-1:** Unidad estructural primaria de la zeolita  
Fuente: (COSTAFAEDRA, L. 2011)

### 1.8.3.3 Carbón Activado

Es una forma amorfa del carbón, el cual se ha sometido a un tratamiento de activación física y/o química, usando como materia prima carbón, madera, cáscara de coco, con el fin de incrementar su área superficial entre otros usado para la adsorción de contaminantes en corrientes gaseosas y líquidas, para la remoción de sustancias orgánicas, recuperación de solventes y como catalizador. Tiene una estructura cristalina similar a la del grafito, presenta una gran porosidad y por tanto una gran capacidad adsorbente. El nombre de carbón activado se aplica a una serie de productos de carbones porosos preparados artificialmente a través de un proceso de carbonización que difieren en propiedades físicas, para que exhiban un elevado grado de porosidad y una alta superficie específica que facilita la adsorción física de gases y vapores de mezclas gaseosas o sustancias dispersas en líquidos (SEVILLA U. P., 2002, p. 8)



**Figura 7-1:** Tipos de Carbón activado  
**Fuente:** (Vélez et al., 2014, p. 41)

#### 1.8.3.4 Gel de sílice

Es un material obtenido sintéticamente, es amorfo muy poroso compuesto por óxidos de silicio que posee un gran área superficial formando un material adsorbente con tamaños de poro entre 6 y 25 nm. Se utiliza en la adsorción de agua a bajas temperaturas; en estas condiciones su capacidad de adsorción de agua es superior a la de otros adsorbentes como las zeolitas. Se pueden utilizar para la separación y adsorción de moléculas, aditivos en pinturas, tecnología de membranas e ingeniería molecular, soporte de catalizadores para formar catalizadores heterogéneos, etc. (Báez, 2004, p. 2)

#### 1.8.4 Adsorción en el suelo

La adsorción en el suelo es uno de los procesos más importantes que se puede dar porque va a determinar la cantidad de sustancia que queda libre y sobre la que va a actuar los demás procesos tales como los biológicos que se dan sobre los compuestos orgánicos.

En el proceso de adsorción de una molécula pueden intervenir varios tipos de interacciones, en cuyo resultado final es la suma de todas ellas. Cada una de ellas interviene en una proporción diferente dependiendo de las características del suelo y de la molécula. Cada una de ellas interviene en una proporción diferente dependiendo de las características del suelo y de la molécula. Según (Bi et al.,

2006) proponen un modelo teórico para la adsorción de una molécula a suelos en el que se tienen en cuenta las principales interacciones que intervienen y su contribución al resultado final:

Coeficiente de adsorción

$$K_d = K_{d.art} + K_{cat} + K_{d,esp}$$

dónde,  $K_d$  es el coeficiente de adsorción de la molécula dado como la razón entre la concentración de esta en el suelo y la concentración libre en la disolución,  $K_{d,part}$  es la adsorción de la molécula en el suelo debido al contenido en materia orgánica, relacionada con el coeficiente de partición.,  $K_{cat}$  es la adsorción debida al mecanismo de intercambio catiónico de la forma cargada de la molécula y  $K_{d,esp}$  se refiere a la adsorción debida a mecanismos específicos de la forma neutra de las moléculas ionizables y no ionizables. (Real, 2010, p. 21)

#### 1.8.5 Equilibrio de adsorción

El equilibrio de adsorción se define cuando el número de moléculas o iones que llega a la superficie del adsorbente es igual al número de moléculas o iones que dejan la superficie del adsorbente. Cuando un fluido que contiene un adsorbato, está en contacto con un sólido, las moléculas de adsorbato se transfieren desde el fluido hasta la superficie del sólido, hasta que los potenciales químicos de ambas fases se igualan.

Así, se establece un equilibrio dinámico en el cual las velocidades de adsorción y desorción son iguales: en estos momentos se dice que se ha alcanzado el equilibrio de adsorción.

La cantidad de material sorbente se juzga de acuerdo a que tanto esta puede adsorber, atraer y retener en forma inmóvil. La cantidad de metal sorbido se calcula con el balance de material del sistema de adsorción: el sorbente que desaparece de la solución se debe encontrar en el sólido.

La cantidad máxima del metal que se puede sorber de la solución puede ser calculada

### Ecuación de la capacidad de adsorción

$$q = \frac{(C_i - C_f) \left(\frac{mg}{l}\right)}{X_{(g)}} V_{(l)}$$

Dónde:

q: cantidad de metal adsorbida (mg/g)

V: volumen de la solución en litros

C<sub>i</sub>: concentración inicial del metal en solución

C<sub>f</sub>: concentración residual (equilibrio) del metal en la solución.

X: cantidad de adsorbente en la solución.

El equilibrio se expresa mediante las isothermas de adsorción, la cantidad adsorbida de una sustancia no solo depende de la composición de sólido sino también de la composición química y de la concentración de la solución tratada (Murillo et al., 2011, p. 93).

#### 1.8.6 *Cinética de adsorción*

Permite determinar el tiempo en que se alcanza la adsorción del adsorbato en el adsorbente y conocer la velocidad en que se alcanza el equilibrio, es decir que se da un aumento de la carga o, una disminución de la concentración de la fase líquida en función del tiempo.

La velocidad de adsorción para alcanzar una cierta separación puede ser establecida mediante el empleo de modelos que involucran coeficientes de transferencia de masa. La cinética describe la velocidad de adsorción del adsorbato en el adsorbente y permite conocer el tiempo en que se alcanza el equilibrio y se realiza antes de la determinación de una isoterma de adsorción

### 1.8.6.1 Modelos cinéticos de adsorción

#### a. Pseudo Primer Orden

Este modelo fue desarrollado por Lagergren en 1898 para procesos de adsorción química de ácido oxálico y ácido malónico en carbón vegetal, y está basado en la capacidad de sorción del sólido, (Qui et al., 2009, p. 716). El modelo lineal es el siguiente:

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

Resolver la ecuación diferencial tomando en cuenta los límites de integración desde:  $q = 0$  a  $t = 0$  y  $q = q_e$  a  $t = t$  resulta:

Ecuación pseudo primer orden

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303}t$$

Dónde:

$q_e$ : Cantidad de soluto adsorbido en el equilibrio por unidad de masa de adsorbente, ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ).

$q_t$ : Cantidad de soluto adsorbido en el equilibrio por unidad de masa de adsorbente al tiempo  $t$ , ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ).

$k_f$ : Constante de velocidad de pseudo primer orden, ( $\text{min}^{-1}$ ).

#### b. Pseudo segundo orden:

Este modelo fue desarrollado para procesos de adsorción química entre el adsorbato y adsorbente, y está basado en la capacidad de sorción del sólido (Murillo et al., 2011, p. 98), se expresa como:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

Separando las variables de la ecuación:

$$\frac{dq_t}{(q_e - q_t)^2} = k_2 dt$$

Integrando la ecuación con respecto a las condiciones límite  $q = 0$  a  $t = 0$  y  $q = q_e$  a  $t = t$ , se obtiene:

**Ecuación 1:** ecuación pseudo segundo orden

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

Dónde:

$q_e$ : Cantidad de soluto adsorbido en el equilibrio por unidad de masa de adsorbente ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ).

$q_t$ : Cantidad de soluto adsorbido en el equilibrio por unidad de masa de adsorbente al tiempo  $t$ , ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ).

$K_2$ : Constante de velocidad de pseudo segundo orden, ( $\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ).

Para lograr deducir las constantes de la cinética de segundo orden, es necesario realizar una gráfica de  $(t/q_t)$  vs.  $(t)$ , de la cual se debería obtener una línea recta y a partir de su pendiente e intercepto, se puede obtener la concentración de equilibrio teórica y la constante de la ecuación, respectivamente; el valor de  $q_e$  teórico es comparado con el experimental de la medición, si los valores son muy cercanos, el modelo obedece al modelo de pseudo segundo orden.

## 1.9 Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción relacionan gráficamente, a una temperatura constante, la concentración de compuesto retenido en la superficie del adsorbente con la concentración inicial del compuesto o la de equilibrio del mismo. (Limousin, 2007, p. 250)

La IUPAC clasifica a las isothermas de adsorción en 6 tipos:

Tipo I: es cóncava hacia el eje de abscisas. A medida que la presión relativa aumenta y la cantidad adsorbida se aproxima a un valor constante. Se presenta en sistemas microporosos, cuando los microporos se llenan con el adsorbato la adsorción se detiene.

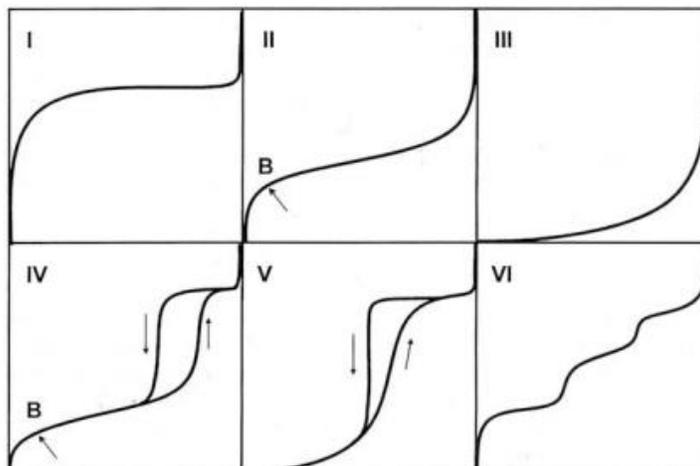
Tipo II: Cuando la presión relativa es baja se forma una monocapa, cuando ya la monocapa se ha formado completamente las presiones relativas se incrementan y originan multicapas. Es característica de sólidos macroporosos y no porosos ya que en ellos se pueden formar multicapas sin ninguna restricción.

Tipo III: Las interacciones entre el adsorbato y el adsorbente son muy débiles, se presenta en materiales macroporosos o no porosos. Al ser las interacciones adsorbato-adsorbente menores, se debe aumentar la presión relativa hasta cierto valor.

Tipo IV: es característica de sólidos mesoporosos. En el inicio se produce una adsorción en monocapa. La no coincidencia de las velocidades de adsorción y desorción presenta un incremento de la cantidad adsorbida mediante un mecanismo de llenado en multicapas a presiones relativas en un rango determinado.

Tipo V es característica de sólidos mesoporosos, cuando las presiones relativas son bajas hay una débil interacción entre el adsorbato y el adsorbente, similar a la isoterma tipo III, sin embargo mientras va aumentando la presión relativa, la interacción entre el adsorbato y el adsorbente también se incrementa.

Tipo VI: representa la adsorción en multicapas sobre superficies no porosas. No es muy frecuente se presenta en sistemas en los que se produce un cambio de densidad en la fase adsorbida a una presión relativa determinada.



**Figura 8-1:** Tipos de isothermas de adsorción según la clasificación de la IUPAC

Fuente: (Pau, 1994, p. 25)

### 1.9.1 Modelos de isothermas

Las isothermas de adsorción indican como las moléculas adsorbidas se distribuyen entre la fase líquida y la sólida cuando el proceso de adsorción alcanza un estado de equilibrio (Rivaset al., 2014, p. 44).

#### 1.9.1.1 La Isotherma de Langmuir:

Fue desarrollada para describir la formación de una monocapa de moléculas del adsorbato sobre una superficie que solo contiene un número determinado de sitios de unión (Unuabonahet al., 2008, p.2), todas las partes de la superficie se comportan del mismo modo y se asume que las energías de las moléculas adsorbidas son uniformes, cada poro del solido contiene solo una molécula de adsorbato es decir que el sistema se satura. (Foo y Hameed 2012, p.3). La ecuación de Langmuir se puede escribir como:

Ecuación de Langmuir

$$q = \frac{q_{max}bC_e}{1+bC_e}$$

Dónde:

q= concentración del soluto retenido en el adsorbente en el equilibrio (mg/g)

$q_{\max}$ =capacidad máxima de adsorción (mg/g)

$C_e$ = concentración de cadmio en la solución en el equilibrio (mg/l)

$b$ = parámetro de la ecuación, constante relacionada con la afinidad del adsorbente por los iones

La isoterma de Langmuir puede evaluarse a partir del factor  $R_L$ . (Sanchez et al., 2008, p.170)

Factor  $R_L$  de Langmuir

$$R_L = \frac{K_L C}{1 + K_L C}$$

Dónde:

$K_L$  = constante de Langmuir (L / mg)

$C$  = concentración en el Equilibrio de Adsorción (mg / L).

El valor  $R_L$  indica la naturaleza de adsorción:

**Tabla 3-1:** tipo de sistema isotérmico según el valor  $R_L$

<i>Desfavorable:</i>	$R_L > 1,$
<i>Lineal:</i>	$R_L = 1$
<i>Favorable</i>	$0 < R_L < 1$
<i>Irreversible:</i>	$R_L = 0.$

Fuente: (Ordóñez, Moreno, 2013, p. 50)

### 1.9.1.2 La isoterma de Freundlich

Describe una adsorción física y reversible, aplicada a la adsorción de superficies heterogéneas y de múltiples capas. La superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea, se aplica en sistemas de compuestos orgánicos heterogéneos (Foo y Hameed, 2012, p.5-7).

Ecuación de Freundlich

$$q_e = K_f C_e^{1/n}$$

Dónde:

$q_e$  = Sustancia adsorbida por gramo de suelo.

$C_e$  = concentración de soluto en la solución en el equilibrio (mg/L)

$K_f, n$  = constantes específicas

## 1.10 Desorción

La desorción es la operación inversa a la adsorción es utilizado para recuperar la capacidad del adsorbente, aunque únicamente cuando ésta se lleva a cabo mediante métodos que no provoquen la destrucción del adsorbato, es decir, la adsorción física. La desorción de un contaminante es más difícil de llevar a cabo y procede en menor medida que la etapa de adsorción.

El grado de irreversibilidad del contaminante en el suelo, conocido como histéresis, dependerá de las propiedades químicas del adsorbato y de las propiedades físicas del sólido (Alexander, 1995).

La histéresis significa que dados dos procesos físicos inversos en el mismo sistema (adsorción y desorción de un contaminante dentro de una matriz sólida), los procesos siguen diferentes rutas en el espacio físico de coordenadas. Si la histéresis es nula, ambas rutas podrían coincidir (Robles et al., 2006, p.306-307)

Se han desarrollado diversas técnicas para conseguir la desorción de un adsorbato del sólido en el que está retenido. Estas técnicas se basan en las propiedades del fenómeno de la adsorción, como son la disminución de la cantidad adsorbida al disminuir la concentración en la fase fluida y al aumentar la temperatura. Así, las técnicas para lograr la desorción son:

- Aumento de la temperatura.
- Disminución de la presión total.
- Arrastre con un inerte.
- Desplazamiento con otro adsorbato.

En muchos procesos industriales se combinan en una misma instalación las operaciones de adsorción y de desorción, con el objetivo de recuperar el disolvente. Por ejemplo en los sistemas de adsorción que utilizan aminas, donde éstas se regeneran (desorción) para su reutilización.(Pau, 1994, p.27).

## **1.11 Marco Legal**

En el Ecuador poseemos la norma oficial contra la contaminación ambiental, la que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales para los sistemas de alcantarillado de las ciudades como también para fuentes de aguas dulces y marítimas. Lo aludido anteriormente lo encontramos según la normativa ecuatoriana TULSMA, en el libro IV, Anexo 1 que establece los siguientes objetivos:

- a) Los límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para las descargas en cuerpos de aguas o sistemas de alcantarillado;
- b) Los criterios de calidad de las aguas para sus distintos usos; y,
- c) Métodos y procedimientos para determinar la presencia de contaminantes en el agua.

Como una medida para controlar la contaminación por cadmio en el agua el Ministerio del Ambiente del Ecuador establece en el Anexo I del Libro VI del TULSMA que los valores límites permitidos en agua para consumo humano, uso doméstico y para fines agrícolas es de 0.01mg.

## CAPÍTULO II

### 2 MARCO METODOLÓGICO

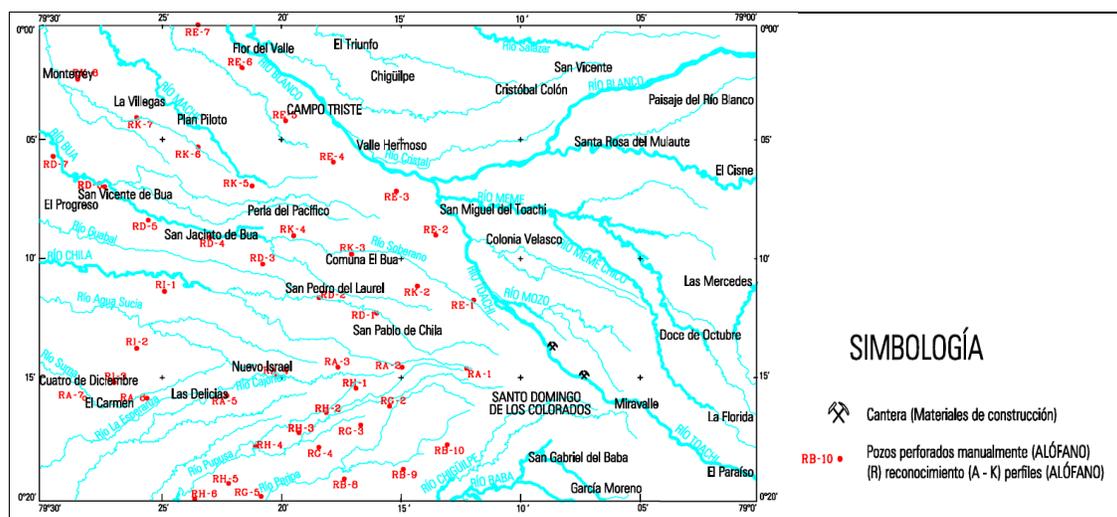
#### 2.1 Unidad de estudio

##### 2.1.1 Localización

Esta investigación se desarrolló en el Centro de Servicios Técnicos y Transferencia Tecnológica Ambiental (CESTTA), ubicado en la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, situada a 2756 msnm con una temperatura promedio de 13°C a 17°C, humedad relativa del ambiente promedio del 30/40% y una presión atmosférica de 540 mm Hg

##### 2.1.2 Población de estudio

Para el presente proyecto se tomó como población un yacimiento de andosol ubicado en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, del cual se tiene antecedentes de poseer un alto contenido de alofán.



**Figura 1-2:** Recursos minerales metálicos y no metálicos de la Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas  
**Fuente:** (Dirección Nacional de Geología, 2006)

## **2.2 Tipo de investigación**

Este trabajo de investigación es de tipo básico con un enfoque aplicativo por que se estudió la capacidad de adsorción del andosol a nivel de laboratorio enfocada hacia una aplicación real de este yacimiento.

Dentro del nivel de investigación, es de tipo explicativa pues se determinó la influencia que tienen las variables pH, dosis, fuerza iónica, tiempo y concentración en la adsorción de cadmio en estudio.

Se realizó una investigación del tipo experimental, controlando las variables ya mencionadas: pH, dosis, tiempo concentración, fuerza iónica determinando el efecto que tienen sobre la adsorción, específicamente sobre la cantidad adsorbida ( $q_{ads}$ ) de cadmio.

### *2.2.1 Tipos de Variables*

### *2.2.2 Variables Independientes*

- Propiedades del sólido
- Relación sólido solución
- Tiempo de agitación
- Características de la fase líquida

### *2.2.3 Variables Dependientes*

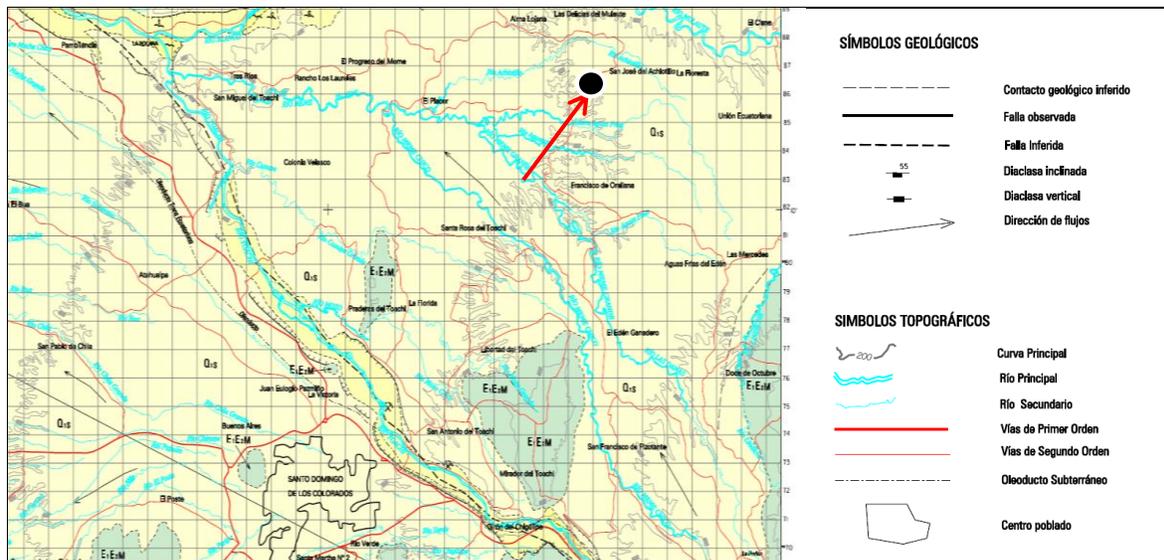
- Capacidad de adsorción y desorción del andosol de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas

## **2.3 Métodos y Técnicas**

### 2.3.1 Obtención del andosol

#### 2.3.1.1 Ubicación de la muestra

El lugar de muestreo se encuentra en un yacimiento ubicado en la comunidad de San José de Achotillo, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, siendo sus coordenadas 17 N 722595 0 UTM



**Figura 2-2:** Ubicación de la Muestra

**Fuente:** (Dirección Nacional de Geología, 2006)

**Realizado por:** Moyano Diego, 2016

#### 2.3.1.2 Método de muestreo

El objetivo del muestreo fue obtener una parte representativa del andosol para la posterior caracterización físico-química y los estudios de adsorción.

El muestreo fue puntual, la muestra fue tomada en una ladera a una profundidad de 5 metros aproximadamente, se colocó la muestra en una bolsa de plástico de alrededor de 5 kg de capacidad, posteriormente fue llevado al laboratorio para su correspondiente homogeneización, secado a temperatura ambiente y tamizado a través de una malla con un tamaño de poro de 2 mm hasta obtener un tamaño de partícula uniforme y almacenada en recipientes herméticos a temperatura ambiente hasta su uso.

### *Materiales*

- Pico pequeño
- Pala manual
- Fundas plásticas
- Guantes

### *2.3.2 Análisis físico y químico del suelo*

#### *2.3.2.1 Cálculo del pH*

Para el cálculo de pH del andosol se utilizó el método EPA 9045D.

Este método es un procedimiento electrométrico para la medición de pH en los suelos y en muestras de desecho. Los residuos pueden ser sólidos, lodos o líquidos no acuosos. Si el agua está presente, debe estar menos del 20 % del volumen total de la muestra.

### *Materiales*

- Muestra de suelo.
- Pipeta de 10 ml.
- Piceta
- pH metro
- Electrodo de vidrio.
- Vaso de precipitación - 50 ml
- Balanza analítica con exactitud de 0,1 g

### *Reactivos*

- Agua destilada
- Solución amortiguadora de pH 7 y 4.

### *Procedimiento*

Para calibrar el instrumento se utilizaron soluciones amortiguadoras para luego comparar, ya sea el potencial eléctrico o el pH directamente de la solución de suelo preparada. Se colocó 20 g de suelo en un vaso de 50 ml, después se agregó 20 ml de agua destilada, se agitó continuamente la suspensión durante 5 minutos. La suspensión de suelo estuvo en reposo aproximadamente 1 hora para permitir que la mayor parte de la arcilla en suspensión se sedimente. Se colocó el electrodo en la muestra de manera que no toque el fondo.

Finalmente, se registraron y anotaron los valores del pH junto con la temperatura de las muestras.

### 2.3.2.2 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica. Se encuentra relacionada con el tipo y valencia de los iones presentes, sus concentraciones, su movilidad, la temperatura del líquido y su contenido de sólidos disueltos.

El método de la conductividad eléctrica se realiza por medio de un conductímetro sobre una muestra de agua o extracto de suelo.

#### *Materiales y equipos*

- Muestra de suelo seco.
- Balanza de precisión con una exactitud de 0,01 g.
- Frascos de plástico de boca ancha de 250 ml.
- Vaso de precipitados de 100 ml.
- Bureta.
- Espátula.
- Discos de papel filtro de tamaño de poro  $\leq 3\mu\text{m}$ .
- Embudo Buchner.
- Piceta con agua destilada.
- Bomba de vacío.
- Probeta.
- Conductímetro.
- Frascos.
- Agua destilada.

- Matraz aforado de 100 ml.

### *Reactivos*

Para la determinación de la conductividad eléctrica se prepararon:

- Solución estándar de cloruro de potasio (KCl) 0.1 N
- Solución estándar de cloruro de potasio (KCl) 0.01 N

### *Procedimiento*

#### *A. Preparación de la pasta de saturación.*

Se pesaron 400g de suelo seco y se colocó en un recipiente de plástico. A la muestra de suelo se agregó agua destilada con la bureta y se removió con una espátula hasta alcanzar el punto de saturación. La pasta se dejó en reposo por tres horas.

#### *B. Obtención del extracto del suelo*

En un embudo Buchner provisto de un disco de papel filtro, humedecido con agua destilada, se colocó la pasta y con el sistema de vacío se realizó la filtración hasta obtener un extracto de aproximadamente 50 ml.

#### *C. Determinación de la conductividad eléctrica.*

Antes de usar el medidor de conductividad debe calibrarse utilizando las soluciones de KCl, 0.1 N y 0.01 N, con cada una se ajustó el equipo a la conductividad indicada en la tabla siguiente:

**Tabla 1-2:** Conductividad especifica de las soluciones de KCl.

Solución de KCl	Conductividad eléctrica a 25°C
0.1 N	12.9 dS/m
0.01 N	1.412 dS/m

Fuente: (Fernández et al., 2006, p.23)

Por último se realizó la medición de la conductividad eléctrica de los filtrados corregida a 25°C. Los resultados se anotaron en microSiemens/centímetro,  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### 2.3.2.3 *Carbono Orgánico Total*

Para la determinación de Carbono Orgánico se utilizó el método de Walkey & Black.

El método está basado en la valoración con dicromato de potasio en medio ácido. El análisis del carbono orgánico se realiza oxidando el carbono del sedimento con un volumen conocido de dicromato de potasio, en ácido sulfúrico concentrado y en presencia de sulfato de plata

El exceso de oxidante se determina con una solución valorada de sulfato ferroso. Con la cantidad de oxidante consumido se calcula la cantidad de materia orgánica consumida.

#### 2.3.2.4 *Humedad*

El método utilizado para esta medición es ASTM D4959, para determinar únicamente la cantidad de agua de los suelos.

La humedad del suelo se calcula por la diferencia de masa entre una misma muestra húmeda, y después de haberse secado en la estufa hasta obtener una masa constante. (Fernández et al., 2006, p. 21-24)

#### *Materiales y equipos*

- Estufa para secado, capaz de mantener una temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Recipientes de metal o vidrio, capacidad de 25 a 100 mL
- Desecador con un agente activo.
- Balanza de precisión con una exactitud de 0,01 g.

### *Procedimiento*

Se pesaron entre 10-20 g de suelo sobre un papel o una charola de aluminio seco y pre pesado, se colocó en la estufa y se procedió al secado del suelo a una temperatura de 105°C hasta obtener masa constante de 12 a 24 horas, después de haber transcurrido dicho tiempo se retiró el suelo de la estufa y se colocó en un desecador durante 45 minutos para enfriar la muestra. Se pesó inmediatamente la muestra y se calculó el porcentaje de humedad en el suelo por la diferencia de masa.

Para calcular el contenido de humedad en el suelo se utilizó la ecuación:

Porcentaje de Humedad del suelo

$$\% \text{ Humedad} = \frac{a - b}{a} * 100$$

Dónde:

a= Masa en g del suelo al aire + masa del recipiente o papel.

b= masa en g del suelo seco a 105°C + masa del recipiente o papel.

### *2.3.2.5 Densidad real*

El método que se utilizó para la determinación de la Densidad fue el Método del picnómetro.

Este método es de gran utilidad para el cálculo de la densidad de productos pulverulentos, como puede ser: cemento, arena, etc. (Hao et al., 2008, p.749).

*Materiales y equipos:*

- Picnómetros o matraces volumétricos de 25 ml
- Desecador al vacío

- Bomba de vacío
- Balanza analítica
- Suelo tamizado (2 mm) y seco en estufa (110° C)



**Figura 3-2:** Picnómetro



**Figura 4-2:** Desecador

### *Procedimiento*

En un picnómetro pre-pesado y limpio, se adicionó 10 g de suelo seco, que ha pasado a través de un tamiz de 2 mm de abertura. Se pesó el picnómetro (incluyendo la tapa) con el suelo. A continuación se añadió agua destilada hasta la mitad del picnómetro y se removió el aire retenido en el suelo, introduciendo el picnómetro a una cámara o desecador para vacío por varios minutos.

Posteriormente, se llenó el picnómetro con agua destilada. Se anotó el peso del picnómetro con su contenido. El suelo del picnómetro fue removido a una cubeta para desechos, el picnómetro fue lavado y a continuación se llenó el picnómetro con agua destilada y se anotó el peso con el agua dentro.

Para calcular la densidad de las partículas se utilizó la siguiente expresión:

#### Calculo de la densidad

$$\rho = \frac{W_s - W_a}{[(W_s - W_a) - (W_{sw} - W_w)]} * \rho_w$$

Dónde:

$W_s$ : Peso del picnómetro con el suelo seco.

$W_a$ : Peso del Picnómetro vacío.

$W_{sw}$ : Peso del Picnómetro con agua destilada y el suelo

$W_w$ : Peso del Picnómetro con agua destilada

$\rho_w$ : Densidad del agua (1 g/cm<sup>3</sup>)

### 2.3.2.6 *Capacidad de intercambio catiónico*

Para la capacidad de intercambio catiónico, se agrega al suelo una solución de acetato de amonio 1 mol/L, en la cual el amonio al ser un catión intercambiable desplaza el Ca, Mg, K y Na del suelo y mediante espectrofotometría de absorción atómica para el caso del Ca y Mg y por espectrofotometría de emisión atómica para el K y Na se determina la concentración por de dichos elementos extraídos. (Fernandez et al., 2006, p.69)

### 2.3.2.7 *Análisis de distribución o tamaño de partícula o textura*

El método del hidrómetro de Bouyoucos es una de las formas más rápidas para analizar el tamaño de las partículas del suelo. El método del hidrómetro implica dispersar las partículas de suelo con una sustancia tal como metafosfato de sodio y después agitar la solución. La cantidad de arena, limo y arcilla en la muestra de suelo está determinada, después de la dispersión, por un hidrómetro, que mide las partículas en suspensión. La cantidad de cada tipo de partícula es determinada utilizando la ley de Stokes, que determina la cantidad de cada tipo de partícula presente por la velocidad a la que cada tipo de ellas cae fuera de suspensión, en base a su tamaño.

### 2.3.2.8 *Metales pesados (Cd, Ni, Pb)*

La determinación de Cd, Pb y Ni en el suelo se determinó de acuerdo al método EPA 3051, en breve resumen: 2 g (peso seco) de suelo se sometieron a digestión con ácido nítrico y peróxido de hidrógeno mediante reflujo a 150°C por dos horas. El digerido que ha reducido su volumen fue diluido hasta 100 mL con agua destilada, posteriormente la solución fue filtrada y en el filtrado se determinó la concentración de los metales mediante absorción atómica.

### 2.3.2.9 Punto de carga Cero (PCC)

Se define como el valor de pH en el que la superficie de los coloides es eléctricamente neutra, es decir, que a un determinado pH la carga neta de superficie de los coloides es 0 o que la suma de cargas negativas es igual a la suma de cargas positivas

El punto de carga cero se determinó por el método de adición de sal (Tan et al., 2008, p. 277-286)

#### *Materiales y equipos:*

- Balanza analítica
- pH metro
- Vasos de precipitación de 50mL
- Matraces aforados de 100 mL
- Pipeta graduada de 10 mL
- Frascos estériles para muestras

#### *Reactivos*

- Solución de Nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) 0.1N
- Agua destilada
- Solución de Ácido Nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 0.1N
- Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) 0.1 N

#### *Procedimiento*

El punto de carga cero fue determinado usando el método de la adición de sólido, 40 mL de  $\text{NaNO}_3$  0.1N fueron transferidos a una serie de frascos de 100 mL, los valores de pH ( $\text{pH}_0$ ) fueron ajustados a 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 por adición de  $\text{NaOH}$  o  $\text{HNO}_3$  0,1 N. El volumen total de la solución en cada recipiente fue justado exactamente a 50 mL por la adición de  $\text{NaNO}_3$  de la misma concentración. El pH ( $\text{pH}_0$ ) fue exactamente medido y el valor anotado. Un gramo del andosol fue adicionado a cada recipiente, y fue tapado inmediatamente. Las suspensiones fueron luego agitadas manualmente y permitidas a equilibrar por 48 horas con intermitente agitación manual. Los valores de pH ( $\text{pH}_f$ ) del líquido sobrenadante fueron anotados. Los valores de la diferencia entre el pH

inicial y final ( $\Delta\text{pH} = \text{pH}_0 - \text{pH}_f$ ) fueron graficados vs el pH inicial. El punto de intersección de la curva resultante al cual  $\Delta\text{pH} = 0$  corresponde al  $\text{pH}_{\text{PCC}}$ .

La carga variable cambia, al participar de la adición de hidróxidos,  $\text{OH}^-$ , o de  $\text{H}^+$ , según la acidez del medio. (Mahomood et al., 2011, p.10019)

### 2.3.3 Estudio de los Factores que afectan la Adsorción de Cadmio

#### 2.3.3.1 Efecto del pH

##### *Materiales y equipos:*

- Balanza analítica
- pH metro
- Vasos de precipitación de 50mL
- Matraces aforados de 100 mL
- Pipeta graduada de 10 mL
- Frascos estériles para muestras
- Tubos de centrifuga de 15mL
- Filtros de jeringa de 13 mm con membrana hidrófoba de PTFE de tamaño de poro 0,22  $\mu\text{m}$
- Jeringa de 20 mL

##### *Reactivos*

- Estándar de cadmio de 1 000  $\text{mgL}^{-1}$
- Solución de Nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) 0,1N
- Agua destilada
- Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) 0,1 N
- Ácido Nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 0,1N

*Procedimiento:*

Para determinar el efecto del pH en el proceso de adsorción de cadmio se procedió de la siguiente manera

Partiendo de un estándar certificado de  $1000 \text{ mgL}^{-1}$  de cadmio se preparó 500 mL de solución de  $5 \text{ mgL}^{-1}$  de cadmio en  $\text{NaNO}_3$  0.1N. Se tomaron 1g de muestra de suelo (andosol) y 12 mL de solución de cadmio, fueron colocados en tubos de centrifuga de polipropileno de 15 mL. Se ajustó el pH de las 5 soluciones a 2.0; 4.0; 6.0; 8.0 y 10.0 respectivamente con una variación de  $\pm 0.03$  unidades de pH, utilizando para ello soluciones buffer de  $\text{HNO}_3$  y  $\text{NaOH}$  0.1N. Las soluciones se agitaron durante una hora, posteriormente se centrifugaron por 10 min a 3000 rpm, los sobrenadantes se filtraron a través de filtros de jeringa de 13 mm con una membrana hidrófoba de PTFE de tamaño de poro  $0,22 \mu\text{m}$ . La concentración de Cd en los sobrenadantes se determinó mediante Espectroscopia de Absorción Atómica para determinar la capacidad de adsorción de cadmio en función del pH.

Con los resultados obtenidos del análisis de laboratorio, se determinó el porcentaje de retención del metal ( $\text{Cd}^{2+}$ ) en el suelo utilizado en el tratamiento. Para el cálculo del porcentaje de adsorción se aplicó la siguiente ecuación:

Porcentaje de adsorción de Cadmio

$$\% \text{adsorción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Dónde:

$C_i$ = Carga contaminante de entrada mg/L

$C_f$ = Carga contaminante de salida mg/L

### 2.3.3.2 Efecto de la dosis del adsorbente

#### *Materiales y equipos:*

- Balanza analítica
- pH metro
- Vasos de precipitación de 50mL
- Matraces aforados de 100 mL
- Pipeta graduada de 10 mL
- Frascos estériles para muestras
- Tubos de centrifuga de 15mL
- Filtros de jeringa de 13 mm con membrana hidrófoba de PTFE de tamaño de poro 0,22  $\mu\text{m}$
- Jeringa de 20 mL

#### *Reactivos:*

- Estándar de cadmio de 1000  $\text{mgL}^{-1}$
- Solución de Nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) 0.1N
- Agua destilada
- Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) .1 N
- Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 0.1N

#### *Procedimiento:*

Para el estudio del efecto de la dosis de adsorbente se preparó 500mL de la solución de 5  $\text{mL}^{-1}$  de cadmio en  $\text{NaNO}_3$  0.1N como fuerza iónica, dicha solución se la ajustó al pH óptimo obtenido en el estudio del efecto del pH (con una variación de  $\pm 0.03$  unidades de pH). Se ubicó 12 mL de solución de cadmio en cada uno de los tubos de centrifuga variando la cantidad de andosol (valor seco) en los siguientes valores: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 g, las soluciones se mantuvieron en agitación durante una hora, posteriormente se centrifugaron por 10 min a 3000 rpm, los sobrenadantes fueron separados a través de filtros de jeringa de 13 mm con una membrana hidrófoba de PTFE de tamaño de poro 0,22  $\mu\text{m}$ . La concentración de Cd en los sobrenadantes se determinó mediante Espectroscopia de Absorción Atómica.

### 2.3.3.3 Efecto de la fuerza iónica

#### *Materiales y equipos:*

- Balanza analítica
- pH metro
- Vasos de precipitación de 50mL
- Matraces aforados de 100 mL
- Pipeta graduada de 10 mL
- Frascos estériles para muestras
- Tubos de centrifuga de 15mL
- Filtros de jeringa de 13 mm con membrana hidrófoba de PTFE de tamaño de poro 0,22  $\mu\text{m}$
- Jeringa de 20 mL

#### *Reactivos:*

- Andosol
- Estándar de cadmio de  $1000 \text{ mgL}^{-1}$
- Soluciones de Nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) 0.005N, 0.01N, 0.05N, 0,1N, 0.5N y 0.1N;
- Agua destilada
- Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) .1 N

#### *Procedimiento:*

Para el estudio del efecto de la fuerza iónica se realizó manteniendo, la concentración de adsorbato y la dosis de adsorbente constante, variando la concentración del electrolito soporte.

Partiendo de una solución madre de  $100 \text{ mgL}^{-1}$  de Cd, en 6 balones aforados se prepararon 50 mL de solución de cadmio de  $5 \text{ mgL}^{-1}$  a diferentes concentraciones de electrolito soporte 0.005N, 0.01N, 0.05N, 0,1N, 0.5N y 1N de  $\text{NaNO}_3$ , ajustando el pH en el valor óptimo con una variación de  $\pm 0.03$  unidades. Las soluciones se colocaron en cada uno de los tubos de centrifuga en un volumen de 12 mL y se agregó la cantidad óptima de la dosis del adsorbente a cada una de las soluciones respectivamente. Las soluciones se mantuvieron en agitación durante una hora, posteriormente se

centrifugaron a 3000 rpm por 10 min, los sobrenadantes fueron separados a través de filtros de jeringa de 13 mm con una membrana hidrófoba de PTFE de tamaño de poro 0,22  $\mu\text{m}$ . La concentración de Cd en los sobrenadantes se determinó mediante Espectroscopia de Absorción Atómica y determinar la concentración óptima de electrolito en la adsorción de cadmio.

#### 2.3.4 Estudios cinéticos y de adsorción

##### 2.3.4.1 Efecto del tiempo de adsorción (cinética de adsorción)

###### *Materiales y equipos:*

- Balanza analítica
- pH metro
- Vasos de precipitación de 50mL
- Matraces aforados de 100 mL
- Pipeta graduada de 10 mL
- Frascos estériles para muestras
- Tubos de centrifuga de 15mL
- Filtros de jeringa de 13 mm con membrana hidrófoba de PTFE de tamaño de poro 0,22  $\mu\text{m}$
- Jeringa de 20 mL

###### *Reactivos:*

- Estándar de cadmio de 1000  $\text{mgL}^{-1}$
- Solución de Nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) 0.1N
- Agua destilada
- Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) .1 N

###### *Procedimiento:*

Para cada tiempo de agitación (5, 10, 15, 30, 60, 120, y 240min) se tomó 12 mL de solución de cadmio con una concentración de  $5\text{mgL}^{-1}$  en  $\text{NaNO}_3$  0.005N como fuerza iónica óptima que fueron

colocados en tubos de centrifuga. En cada solución se ajustó a pH10 con una variación de  $\pm 0.03$  unidades de pH y se agregó 1 g de muestra de suelo respectivamente; se agitaron en los tiempos establecidos, posteriormente se centrifugaron a 3000 rpm por 10 min, los sobrenadantes fueron separados a través de filtros de jeringa de 13 mm con una membrana hidrófoba de PTFE de tamaño de poro 0,22  $\mu\text{m}$ . La concentración de Cd en los sobrenadantes se determinó mediante Espectroscopia de Absorción Atómica y con ello determinar el tiempo óptimo de adsorción de cadmio

#### 2.3.4.2 *Isotermas de adsorción*

##### *Materiales y equipos:*

- Balanza analítica
- pH metro
- Vasos de precipitación de 50mL
- Matraces aforados de 100 mL
- Pipeta graduada de 10 mL
- Frascos estériles para muestras
- Tubos de centrifuga de 15mL
- Filtros de jeringa de 13 mm con membrana hidrófoba de PTFE de tamaño de poro 0,22  $\mu\text{m}$
- Jeringa de 20 mL

##### *Reactivos:*

- Estándar de cadmio de  $1000 \text{ mgL}^{-1}$
- Solución de Nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) 0.1N
- Agua destilada
- Hidróxido de sodio (NaOH) .1 N

##### *Procedimiento:*

El método empleado en los experimentos de adsorción es el método Batch, el ensayo se realizó por duplicado.

El método consistió en preparar soluciones de 1 ppm, 2 ppm, 3ppm, 4ppm, 5ppm ,6 ppm, 7ppm, 8 ppm, 9 ppm y 10 ppm de cadmio en  $\text{NaNO}_3$  0.005N cada una, a cada solución se ajustó a pH10, se colocó 12 mL se cada solución en tubos de centrifuga y se agregó 1 g de andosol, se mantuvo en agitación durante 60 minutos, posteriormente se centrifugaron a 3000 rpm por 10 min, los sobrenadantes fueron separados a través de filtros de jeringa de 13 mm con una membrana hidrófoba de PTFE de tamaño de poro 0,22  $\mu\text{m}$ . La concentración de Cd en los sobrenadantes se determinó mediante Espectroscopia de Absorción Atómica, los datos obtenidos se utilizaron para evaluar la capacidad máxima de retención ( $q_{\text{max}}$ ) de cadmio.

### 2.3.5 Estudios de desorción

#### 2.3.5.1 Isotermas de desorción

#### *Materiales y equipos:*

- Balanza analítica
- pH metro
- Vasos de precipitación de 50mL
- Matraces aforados de 100 mL
- Pipeta graduada de 10 mL
- Frascos estériles para muestras
- Tubos de centrifuga de 15mL
- Filtros de jeringa de 13 mm con membrana hidrófoba de PTFE de tamaño de poro 0,22  $\mu\text{m}$
- Jeringa de 20 mL

#### *Reactivos:*

- Solución de Nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) 0.1N
- Agua destilada

*Procedimiento:*

Este procedimiento sirve para saber si la adsorción de cadmio en el suelo, es permanente y se realiza determinando la concentración de cadmio en el lixiviado del suelo contaminado.

Inmediatamente finalizado la adsorción a los tubos conteniendo el residuo sólido se le adicionó 12 mL de la solución de electrolito ( $\text{NaNO}_3$ ) 0.1 N, los tubos se agitaron durante 60 min, posterior a la agitación los tubos fueron centrifugados a 3000 rpm por 10 minutos, el líquido sobrenadante fue separado a través de filtros de jeringa de 13mm con una membrana hidrófoba de PTFE de tamaño de poro 0,22  $\mu\text{m}$ . La concentración desorbida en los sobrenadantes se determinó mediante Espectroscopia de Absorción Atómica.

## CAPÍTULO III

### 3 MARCO DE DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se presenta todos los resultados y análisis obtenidos de la parte experimental, con sus respectivas discusiones.

#### 3.1 Caracterización físico-química del suelo

**Tabla 1-3:** Resultados del análisis físico-químico del suelo (andosol)

PARAMETRO	METODO/NORMA	UNIDAD	RESULTADO
Potencial de Hidrogeno	PEE/LABCESTTA/24 EPA 9045D	Unidades de pH	6,60
Conductividad Eléctrica	PEE/LABCESTTA/85 EPA 9045D	uS/cm	17,58
Carbono Orgánico Total	PEE/LABCESTTA/160 Oxidación Humedad/ Walkley & Black	%	1,05
Humedad	PEE/LABCESTTA/80 ASTM D4959	%	47,11
Densidad real	Gravimétrico	g/ml	1,05
Capacidad de Intercambio Catiónico	PEE/LABCESTTA/90 Absorción atómica	meq/100g	13,24
Cadmio	PEE/LABCESTTA/76 EPA SW - 846 N 3050B, 7130	mg/Kg	0,1
Níquel	PEE/LABCESTTA/77 EPA SW - 846 N 3050B, 7520	mg/Kg	5,26
Plomo	PEE/LABCESTTA/78 EPA SW - 846 N 3050B, 7420	mg/Kg	5,62
Textura	PEE/LABCESTTA/100 Densímetro Bouyoucos	%	Arena Arcilla Limo 94,0 3,1 2,9

Fuente: CESTTA, 2016

Realizado por: Moyano Diego 2016

La caracterización físico-química del Andosol demuestra que el suelo no tiene ningún porcentaje de partículas mayores de 2 mm, es decir no hay porcentaje retenido en el tamiz No. 10” y mayores.

El pH del medio acuoso está determinado por los iones H<sup>+</sup> presentes en la solución del suelo, dio un valor de 6,60 lo que de acuerdo a la clasificación para pH indica que el suelo es neutro.

**Tabla 2-3:** Criterio de evaluación del suelo con respecto al *pH*.

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

Fuente: (Rivas et al, 2014, p.45)

El pH es importante para la capacidad de intercambio catiónico, a un pH ácido las partículas del suelo se comporta como intercambiadora de aniones para valores más básicos se comporta como intercambiadora de cationes, lo que se demostró en el estudio, que a pH alcalino se presentó un mayor porcentaje de adsorción.

Los contenidos de materia orgánica (M.O) del suelo es bajo (<2%), lo que puede indicar moderada capacidad de retener cationes, tal como se observa en los valores de capacidad de intercambio catiónico (C.I.C).

La Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C) promedio es de: 13,24 meq/100 g. de suelo, la CIC depende de la composición del suelo, especialmente de las arcillas y la materia orgánica, cuanto mayor sea la capacidad de intercambio catiónico, mayor será la capacidad del suelo de fijar metales

De acuerdo a la clasificación de CIC según (Chávez, 2003, p.109), la Capacidad de intercambio catiónico del andosol es normal.

**Tabla 3-3:** Clasificación CIC

CIC meq/100g	
<6	Muy Débil
6-10	Débil
10-20	Normal
20-30	Elevada
>30	Muy Elevada

Fuente: (Chávez, 2003, p.109)

Mediante la comparación con la tabla de criterios de calidad del suelo del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, se ha podido determinar que el cadmio (Cd) se encuentra en una concentración de 0,1 mg/Kg siendo el límite máximo permisible 5 mg/Kg, el plomo (Pb) está en una concentración de 5,62 mg/Kg siendo el límite máximo permisible 25 mg/Kg, níquel (Ni) está en una concentración de 5,26 mg/Kg cuyo límite máximo permisible es 20 mg/Kg, por lo que se deduce que el suelo no presenta ningún tipo de contaminación por metales pesados.

### 3.2 Punto de Carga Cero (PCC)

#### Cálculos

- 1 000 mL de Solución de Nitrato de sodio (NaNO<sub>3</sub>) 0.1N

X gramos de NaNO<sub>3</sub>:

0,1 eq-g	1 mol	84,994g NaNO <sub>3</sub>	1* 10 <sup>-3</sup> L	100	1000 ml
L	1eq-g	1 mol NaNO <sub>3</sub>	1 mL	99	

X= 8,58254 g NaNO<sub>3</sub>

- 100 mL de Solución de Ácido Nítrico (HNO<sub>3</sub>) 0.1N

Densidad de HNO<sub>3</sub>: 1,42 g/mL

X mL de HNO<sub>3</sub>:

0,1 eq-g	1 mol	63,01g HNO <sup>3</sup>	mL	100	0,1 L
L	1eq-g	1 mol HNO <sub>3</sub>	1,42 g	70	

X= 6,33 mL HNO<sub>3</sub>

- **100 mL de Hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N**

X gramos de NaNO<sub>3</sub>:

0,1 eq-g	1 mol	40g NaOH	1* 10 <sup>-3</sup> L	100	100 mL
L	1eq-g	1 mol NaOH	1 mL	98	

X = 0,4081 g NaOH

El cálculo para determinar ΔpH fue el siguiente:

$$\Delta pH = pH_i - pH_f$$

Ejemplo:

**Para la muestra 1:**

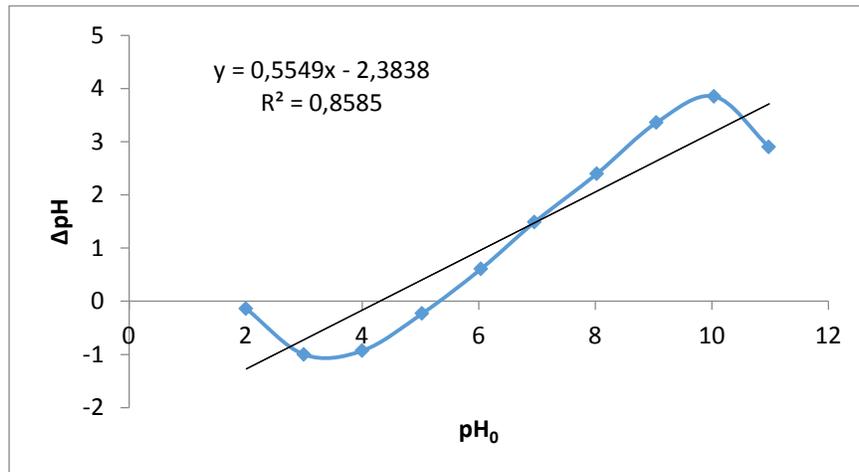
$$\Delta pH = 2,01 - 2,15$$

$$\Delta pH = -0,14$$

**Tabla 4-3:** Resultados del PPC en el primer ensayo

$pH_i$	$pH_f$	$\Delta pH$
2,01	2,15	-0,14
3	4	-1
4	4,93	-0,93
5,03	5,26	-0,23
6,04	5,43	0,61
6,96	5,47	1,49
8,03	5,63	2,4
9,05	5,69	3,36
10,04	6,19	3,85
10,98	8,08	2,9

Realizado por: Moyano Diego, 2016.



**Gráfico 1-3:** Determinación de PPC en el primer ensayo

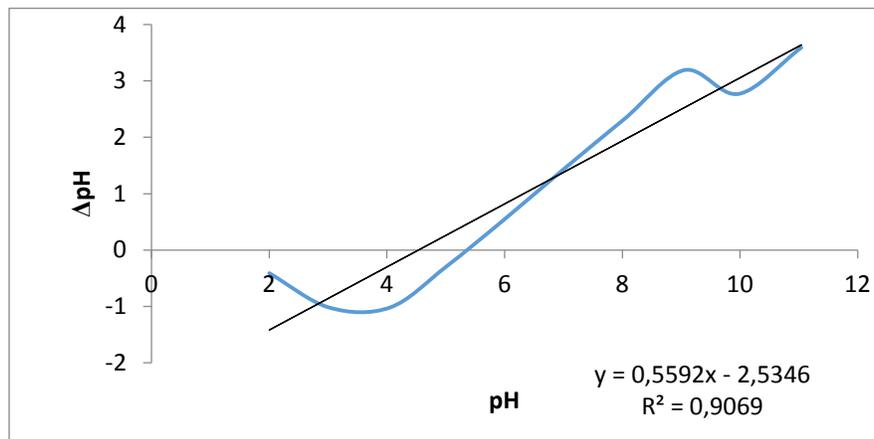
Realizado por: Moyano Diego, 2016.

La intersección de la curva con el eje  $\Delta pH = 0$ , proporciona el valor de pH correspondiente al PCC. Cada curva presentó una sola intersección con  $\Delta pH = 0$ , por lo cual el valor de pH al PCC es único.

**Tabla 5-3:** Resultados del PPC en el segundo ensayo

$pH_0$	$pH_f$	$\Delta pH$
2	2,41	-0,41
3,02	4,04	-1,02
4,05	5,07	-1,02
5	5,3	-0,3
5,98	5,45	0,53
7,01	5,57	1,44
8,03	5,71	2,32
9,05	5,86	3,19
9,98	7,21	2,77
11,04	8,08	2,9

Realizado por: Moyano Diego, 2016



**Gráfico 2-3:** Determinación de PPC en el primer ensayo

Realizado por: Moyano Diego, 2016.

Los valores de PCC en los dos ensayos varían de 4,22 a 5,47

La determinación del punto de carga cero es importante. La adsorción de cationes se ve favorecida a  $pH > pH_{PCC}$ , mientras que la adsorción de aniones se ve favorecida a  $pH < pH_{PCC}$ , esto debido a que bajo el PCC la superficie está cargada positivamente y sobre el PCC la superficie de las partículas estará cargada negativamente. El punto de carga cero es el punto al cual los grupos funcionales ácidos o básicos no contribuyen al pH de la solución, como se puede observar en los Gráficos 1-3 y 2-3, este se encuentra alrededor de 4,22 y 5,47 respectivamente.

La magnitud de estos valores es similar a los obtenidos por (Sakurai et al. ,1989) en Andosoles de Japón (PCC = 4.74 a 5.18), e indica la dominancia de minerales con carga variable, ya que los minerales arcillosos con carga negativa permanente presentan valores de PCC más bajos.

### 3.3 Estudio de los Factores que afectan la Adsorción de Cadmio

#### 3.3.1 Efecto del pH

Este tratamiento fue realizado con la finalidad de determinar la influencia del pH de la solución en el proceso de adsorción, ello la cantidad de agua a tratar fue contaminada a una concentración de 5 ppm de cadmio luego se trató en agua a valores de pH de 2, 4, 6, 8, 10 y luego las muestras fueron analizadas en el laboratorio CESTTA determinando el valor final de concentración de cadmio.

#### Cálculos

Para preparar 500 mL de solución de 5mg/L de cadmio se utilizó una solución estándar de Cd de 1000 mg/L:

- **Volumen de la solución patrón de Cadmio**

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2$$

$$V_1 = \frac{(C_2 * V_2)}{C_1}$$

$$V_1 = \frac{(5_{mg/L} * 500_{mL})}{1\ 000_{mg/L}}$$

$$V_1 = 2,5\ mL\ de\ solución\ de\ 1.000\ ppm\ de\ Cd.$$

- **500 mL de Solución de Nitrato de sodio (NaNO<sub>3</sub>) 0,1N**

X gramos de NaNO<sub>3</sub>:

0.1 eq-g	1 mol	84,994g NaNO <sub>3</sub>	1* 10 <sup>-3</sup> L	100	500 ml
L	1eq-g	1 mol NaNO <sub>3</sub>	1 mL	99	

$$X = 4,9224 \text{ g NaNO}_3$$

Utilizando las soluciones buffer de HNO<sub>3</sub> y NaOH 0,1N anteriormente preparados se ajustó el pH a los valores deseados.

- **Cálculo del porcentaje de adsorción:**

$$\% \text{adsorción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Ejemplo:

**Para la muestra 1:**

$$\% \text{adsorción} = \frac{5_{(mg/L)} - 0,554_{(mg/L)}}{5_{(mg/L)}} \times 100$$

$$\% \text{adsorción} = 88,92$$

En este análisis se valora que el pH es un parámetro óptimo para el andosol como medio filtrante. De las concentraciones obtenidas, se procedió a calcular y analizar el porcentaje de adsorción:

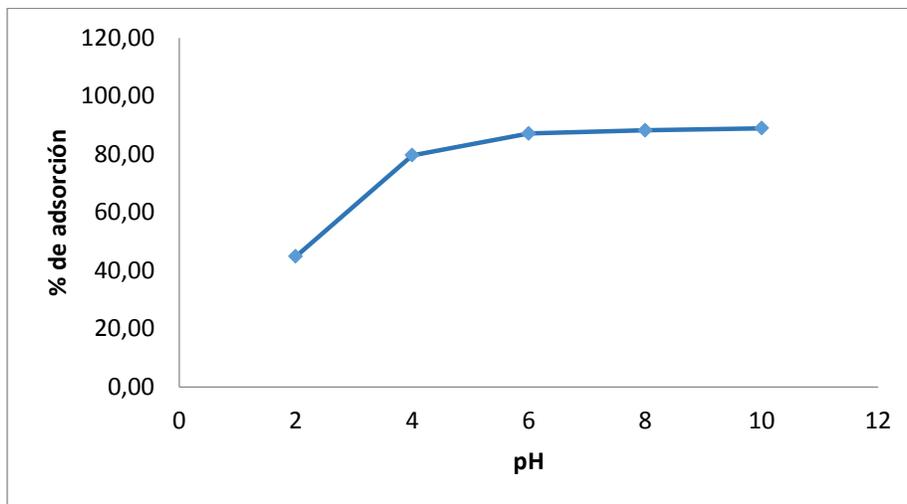
**Tabla 6-3:** Resultados del efecto del pH sobre la adsorción

<i>Valor del pH</i>	<i>Concentración inicial Cd<sup>2+</sup> (mg/l)</i>	<i>Concentración final Cd<sup>2+</sup> (mg/L)</i>	<i>% de adsorción Cd<sup>2+</sup></i>
2	5	2,7575	44,85
4	5	1,02	79,6
6	5	0,646	87,08
8	5	0,589	88,22
10	5	0,554	88,92

Realizado por: Moyano Diego, 2016.

De acuerdo a lo observado en la tabla 6-3, el valor de pH óptimo para la adsorción del cadmio es equivalente a pH10 con un 88,92% de retención del metal, a pH2 se registró un valor de 44,85% de adsorción.

Esto se debe a que el suelo al encontrarse en un medio alcalino la superficie de sus partículas está cargado negativamente, por lo tanto tiende a atraer una mayor cantidad de cationes.



**Gráfico 3-3:** Resultados del efecto del pH sobre la adsorción de Cd

Realizado por: Moyano Diego, 2016.

### 3.3.2 Efecto de la dosis del adsorbente

Se preparó 500mL de la solución de 5 mL<sup>-1</sup> de cadmio en NaNO<sub>3</sub> 0.1N, ajustada a pH 10±0.03 con NaOH 0,1N

- **Cálculo del porcentaje de adsorción:**

$$\%adsorción = \frac{Ci - Cf}{Ci} \times 100$$

Ejemplo:

**Para la muestra 1**

$$\%adsorción = \frac{5_{(mg/L)} - 1,903_{(mg/L)}}{5_{(mg/L)}} \times 100$$

$$\% adsorción = 61,94$$

De acuerdo a lo que se observa en la tabla 7-3 la masa óptima para la adsorción de cadmio es equivalente a 1 g de adsorbente con un 83,5% de retención del metal, y seguido de las demás masa en orden descendente, siendo la última de 0,2 g con 61,94 %, se evidencia una disminución progresiva de al adsorción.

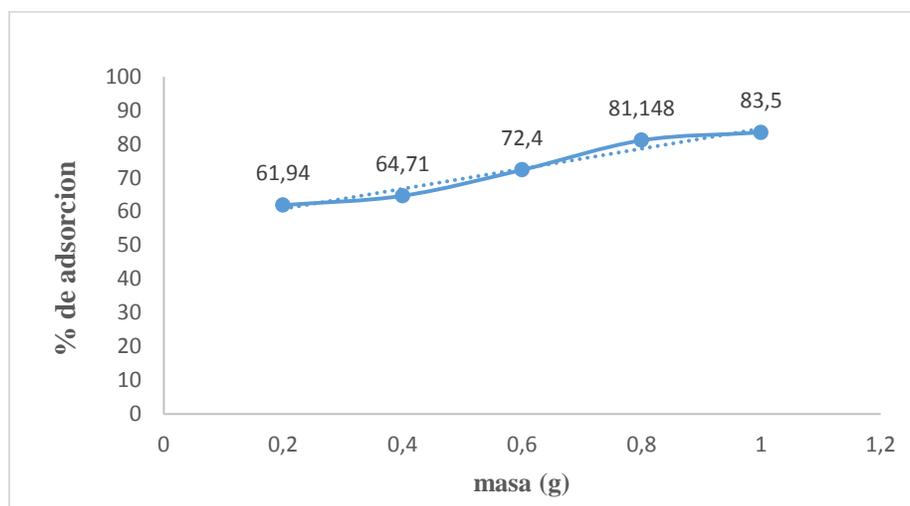
**Tabla 7-3:** Resultados del efecto de la dosis sobre la adsorción

<i>masa(g)</i>	<i>Concentración inicial Cd<sup>2+</sup> (mg/l)</i>	<i>Concentración final Cd<sup>2+</sup> (mg/l)</i>	<i>% de adsorción</i>
0,2	5	1,903	61,94
0,4	5	1,7645	64,71
0,6	5	1,380	72,4
0,8	5	0,9426	81,148
1	5	0,825	83,5

Realizado por: Moyano Diego, 2016

El efecto de adsorción fue mayor a medida de que se aumentaba la masa del adsorbente (ver el Gráfico 4-3), lo cual se podría asociar con la mayor cantidad de centros de adsorción en el suelo,

aumenta la adsorción por la fase sólida. Se observa que el mayor incremento se encontró al variar la masa de adsorbente de 0,6g a 0,8g.



**Gráfico 4-3:** Resultados del efecto de la dosis sobre la adsorción de Cd  
Realizado por: Moyano Diego, 2016.

### 3.3.3 Efecto de la fuerza iónica

A las soluciones se las ajustó a pH10 (pH óptimo) utilizando un buffer de NaOH 0,1 N, ello la cantidad de agua a tratar fue contaminada con 5 ppm de cadmio a diferentes concentraciones de electrolito soporte (0,005N; 0,01N; 0,05N; 0,1N; 0,5N y 1N de NaNO<sub>3</sub>).

- **Volumen de la solución patrón de Cadmio**

Partiendo de una solución patrón de cadmio de 100 mg/L

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2$$

$$V_1 = \frac{(C_2 * V_2)}{C_1}$$

$$V_1 = \frac{(5_{mg/L} * 50_{mL})}{100_{mg/L}}$$

$V_1 = 2,5 \text{ mL}$  de solución de 100 ppm de Cd.

**Para la muestra 1:**

- **50 mL de Solución de Nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) 0,005N**

X gramos de  $\text{NaNO}_3$ :

0.005 eq-g	1 mol	84,994g $\text{NaNO}_3$	$1 * 10^{-3} \text{ L}$	100	50 ml
L	1eq-g	1 mol $\text{NaNO}_3$	1 mL	99	

X= 0,0214 g  $\text{NaNO}_3$

- **Cálculo del porcentaje de adsorción:**

$$\%adsorción = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Ejemplo:

**Para la muestra 1:**

$$\%adsorción = \frac{5_{(mg/L)} - 0,356_{(mg/L)}}{5_{(mg/L)}} \times 100$$

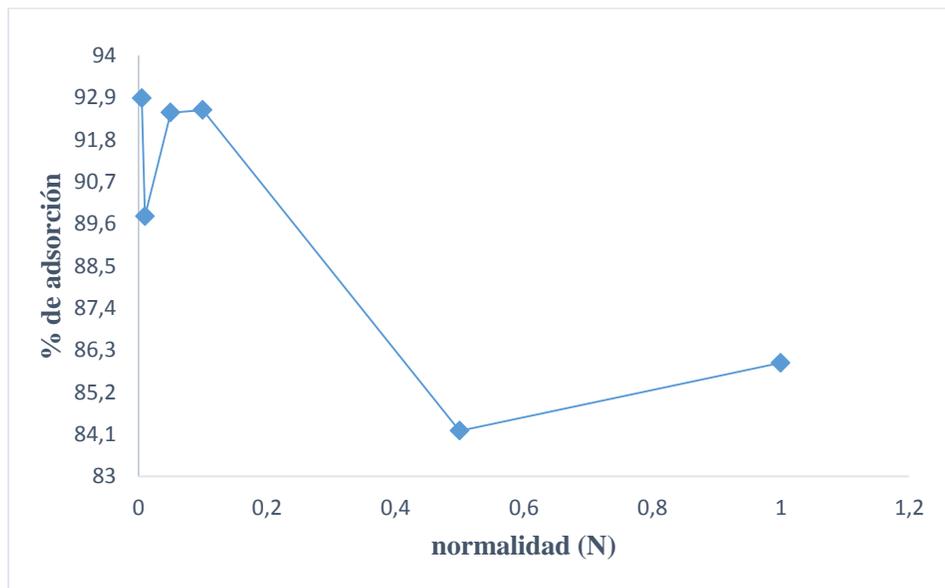
$$\% adsorción = 92,88$$

En la tabla 8-3 se observa que la máxima adsorción de cadmio se produce a una concentración de 0,005 N con 92.88% de retención del metal.

**Tabla 8-3:** Resultados del efecto de la fuerza iónica

<i>Normalidad(N)</i>	<i>Concentración inicial Cd<sup>2+</sup> (mg/l)</i>	<i>Concentración final Cd<sup>2+</sup> (mg/l)</i>	<i>% de adsorción</i>
0,005	5	0,356	92,88
0,01	5	0,51	89,8
0,05	5	0,3748	92,504
0,1	5	0,3716	92,568
0,5	5	0,7904	84,192
1	5	0,7016	85,968

Realizado por: Moyano Diego, 2016



**Gráfico 5-3:** Resultados del efecto del electrolito soporte sobre la adsorción de Cd

Realizado por: Moyano Diego, 2016.

En el Gráfico 5-3 se observa el efecto negativo de la fuerza iónica en la adsorción de iones cadmio. La existencia de iones en la solución, portadores de carga positiva, generalmente apantallan cargas netas estabilizando la electrostática de la solución. En ese afán, los iones sodio, que se encuentran en concentraciones muy superiores al metal, impiden el contacto y reducen la adsorción superficial.

### 3.4 Estudios Cinéticos y de Adsorción

La cinética describe la velocidad de adsorción del adsorbato en el adsorbente y determina el tiempo en que se alcanza el equilibrio.

Para la determinación de la concentración del soluto retenido en el adsorbente en el equilibrio ( $q$ ) se utilizó la ecuación:

$$q = \frac{(C_i - C_f) \left(\frac{mg}{l}\right) V_{(l)}}{X_{(g)}}$$

Dónde:

$q$ : concentración del soluto retenido en el adsorbente en el equilibrio (mg/g)

$V$ : volumen de la solución en litros

$C_i$ : concentración inicial del metal en solución

$C_f$ : concentración residual (equilibrio) del metal en la solución.

$X$ : cantidad de adsorbente en la solución.

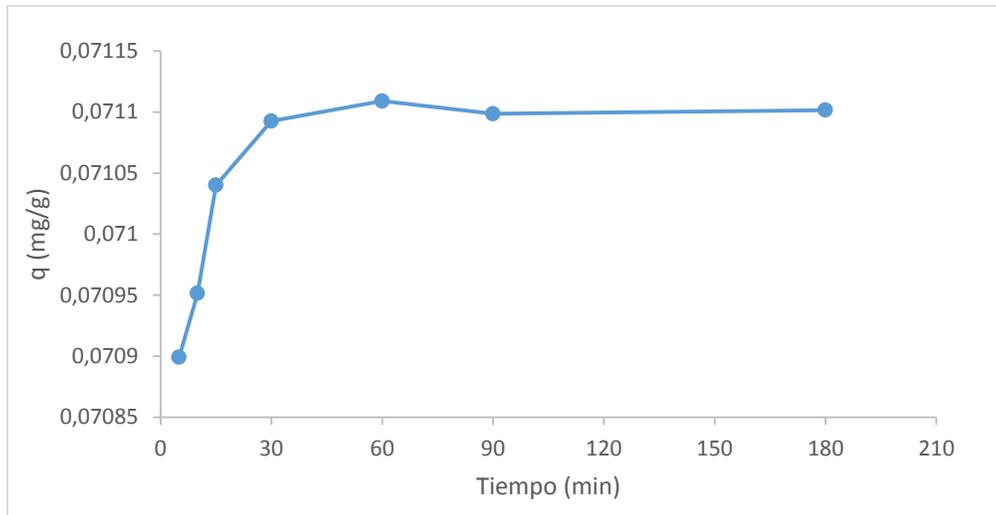
#### 3.4.1 Efecto del tiempo de adsorción (cinética de adsorción)

**Tabla 9-3:** Cantidad de cadmio adsorbido a través del tiempo de agitación

<i>Tiempo(min)</i>	<i>Concentración inicial Cd<sup>2+</sup> (mg/l)</i>	<i>Concentración final Cd<sup>2+</sup> (mg/l)</i>	<i>q (mg/g)</i>	<i>% de adsorción</i>
5	5	0,2734	0,070899	94,532
10	5	0,2699	0,0709515	94,602
15	5	0,264	0,07104	94,72
30	5	0,2605	0,0710925	94,79
60	5	0,2594	0,071109	94,812
90	5	0,2601	0,0710985	94,798
180	5	0,2599	0,0711015	94,802

Realizado por: Moyano Diego, 2016.

En el Gráfico 6-3 se observa que el tiempo de equilibrio fue de 60 min., este corresponde al punto máximo de adsorción de cadmio.



**Gráfico 6-3:** Variación de la concentración de cadmio con respecto al tiempo de agitación  
**Realizado por:** Moyano Diego, 2016.

Con los datos obtenidos, se aplicaron los modelos de pseudo primer-orden según Lagergren y de pseudo segundo-orden para analizar la cinética de adsorción para determinar cuál de los modelos propuestos es el que mejor describe la cinética de adsorción.

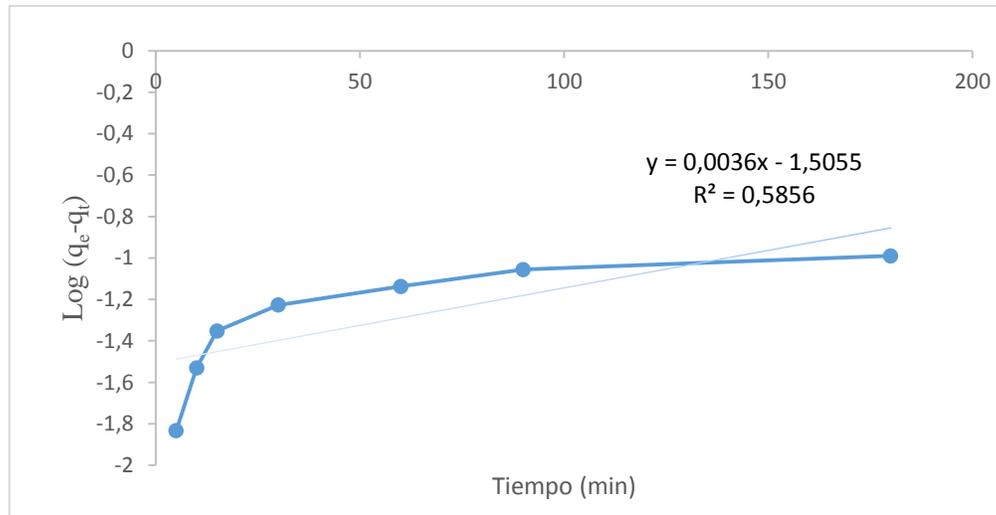
### 3.4.1.1 Modelo de pseudo primer orden

Propuesto por Lagergren para procesos de adsorción en fase líquida, el modelo es definido como:

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

En su forma linealizada:

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t$$



**Gráfico 7-3:** Modelo cinético de pseudo primer orden para la adsorción de Cadmio  
 Realizado por: Moyano Diego, 2016.

En la tabla 10-3 se muestran los parámetros cinéticos obtenidos según el modelo de pseudo primer orden. La gráfica de  $\log(q_e - q_t)$  vs  $t$  no dio un resultado lineal, el valor de  $R^2$  no se aproximan a la unidad lo que indica que hay una fuerte desviación de los valores de los parámetros por lo tanto la adsorción de cadmio no se ajusta al modelo de pseudo primer orden.

Además, se observa que los valores experimentales  $q_e$  no concuerdan con los valores calculados a partir del modelo.

### 3.4.1.2 Modelo de pseudo segundo orden

Este modelo fue desarrollado para procesos de adsorción química entre el adsorbato y adsorbente, y está basado en la capacidad de sorción del sólido, se expresa como:

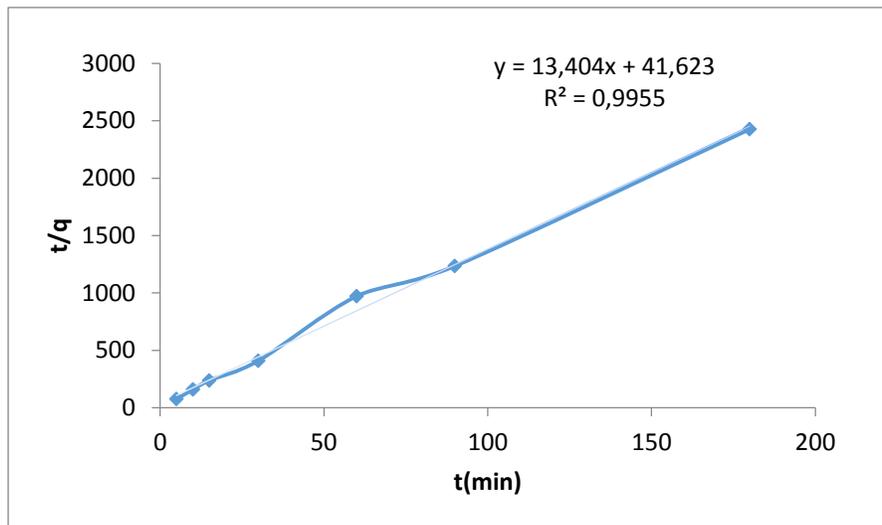
$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

Integrando la ecuación se obtiene:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

La constante de velocidad del modelo de pseudo segundo orden se emplea para calcular la velocidad de adsorción inicial,  $h$  (mg / (g·min)):

$$h = k_2 q_e^2$$



**Gráfico 8-3:** Modelo cinético de pseudo segundo orden para la adsorción de Cadmio  
**Realizado por:** Moyano Diego, 2016.

De los resultados del ajuste al modelo propuesto se deriva que  $k = 4.3165369 \text{ g/ (mg·min)}$  y  $q_e = 0.0746046 \text{ mg cadmio/g de andosol}$ . Los resultados muestran una mayor correlación  $= 0,99457$ , además se puede observar que los valores de  $q_e$  experimentales, se aproximan a los  $q_e$  calculados.

Teniendo en cuenta la excelente capacidad de adsorción observada, se puede considerar este método como adecuado.

**Tabla 10-3:** Parámetros de los modelos cinéticos pseudo primer orden y pseudo segundo orden

Modelo de pseudo primer orden		Modelo de pseudo segundo orden	
$q_e$ (mg/g)	0,03122482	$q_e$ (mg/g)	0.0746046
$K_1$	0,0082908	$K_2$	4.3165369
		$h$	0,0240249
$R^2$	0,5856	$R^2$	0,99457

Realizado por: Moyano Diego, 2016.

### 3.4.2 Isotermas de adsorción

De acuerdo a los resultados obtenidos previamente se puede establecer en general, las mejores propiedades adsorbentes del andosol para realizar el proceso de adsorción son: 1 gr de suelo, solución de cadmio en disoluciones de concentración inicial de 1 a 10 mg/L en NaNO<sub>3</sub> 0.005N a pH 10 y con un tiempo de agitación de 60min.

- **Volumen de la solución patrón de Cadmio**

Partiendo de una solución patrón de cadmio de 100 mg/L

**Para la muestra 1:**

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2$$

$$V_1 = \frac{(C_2 * V_2)}{C_1}$$

$$V_1 = \frac{(1_{mg/L} * 50_{mL})}{100_{mg/L}}$$

$$V_1 = 0,5 \text{ mL de solución de } 100 \text{ ppm de Cd.}$$

- **50 mL de Solución de Nitrato de sodio (NaNO<sub>3</sub>) 0.005N**

X gramos de NaNO<sub>3</sub>:

0.005 eq-g	1 mol	84,994g NaNO <sub>3</sub>	1* 10 <sup>-3</sup> L	100	50 ml
L	1eq-g	1 mol NaNO <sub>3</sub>	1 mL	99	

X= 0,0214 g NaNO<sub>3</sub>

- **Cálculo del porcentaje de adsorción:**

$$\%adsorción = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Ejemplo:

**Para la muestra 1:**

$$\%adsorción = \frac{1_{(mg/L)} - 0,0223_{(mg/L)}}{1_{(mg/L)}} \times 100$$

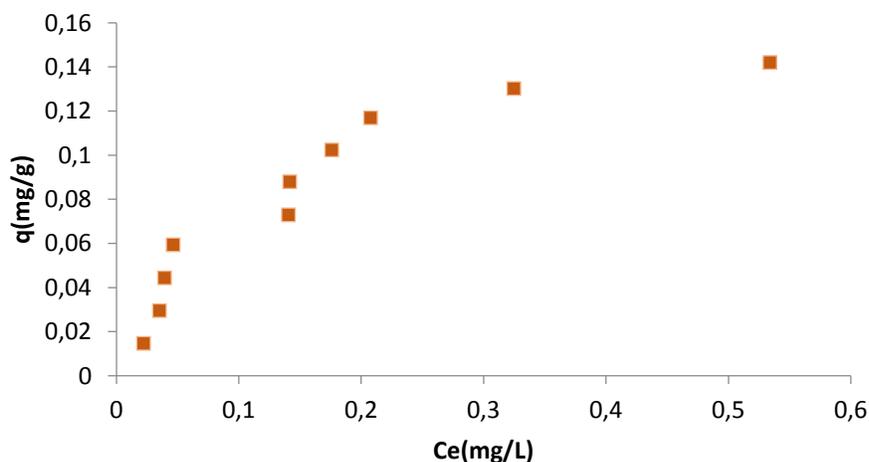
$$\% adsorción = 97,770$$

**Tabla 11-3:** Adsorción de Cd en el andosol

Muestra	Cantidad de suelo (g)	pH	Tiempo de agitación (min)	Concentración inicial de Cd <sup>2+</sup> C <sub>i</sub> (mg/mL)	Concentración final C <sub>f</sub> (mg/L)	concentración del soluto retenido en el adsorbente q (mg/g)	% de adsorción
C1	1	10 ±0.05	60	1	0,0223	0,0146655	97,770
C2				2	0,0352	0,029472	98,240
C3				3	0,0396	0,044406	98,680
C4				4	0,0466	0,059301	98,835
C5				5	0,1408	0,072888	97,184
C6				6	0,1417	0,0878745	97,638
C7				7	0,176	0,10236	97,485
C8				8	0,2079	0,1168815	97,401
C9				9	0,3248	0,130128	96,391
C10				10	0,5341	0,1419885	94,659

Realizado por: Moyano Diego, 2016

Los resultados obtenidos de la adsorción de Cd<sup>2+</sup> en andosol son representados en la figura 9-3:



**Gráfico 9-3:** cantidad adsorbida de Cd<sup>2+</sup> vs concentración en equilibrio

Realizado por: Moyano Diego, 2016

La isoterma es de tipo L, que describe una alta afinidad de adsorción entre adsorbato y adsorbente. La cantidad de metal adsorbido se incrementa rápidamente al aumentar la concentración del metal en la solución, pero mientras la superficie del adsorbente se va cubriendo con el metal, la adsorción se hace más lenta, alcanzando una máxima capacidad de adsorción de 0,1419 mg/g de cadmio.

El porcentaje de remoción en la mayoría de los casos disminuye a medida que aumenta la concentración de los iones en solución, esto podría deberse a que el sólido se va saturando de las especies en solución y por lo tanto la capacidad de adsorción se ve reducida. Este efecto fue claramente demostrado en la Figura 9-3.

### *Proceso de Linealización*

Los datos experimentales de las isothermas de adsorción de  $Cd^{2+}$  sobre el andosol se ajustaron usando los modelos de las isothermas de Freundlich y Langmuir.

El modelo de Freundlich está basado en la adsorción sobre una superficie energéticamente heterogénea; es decir, los sitios de adsorción con la misma energía de interacción adsorbato-adsorbente se encuentran agrupados en pequeñas áreas, sugiriendo que los sitios de enlace no son equivalentes. ( Campos Medina 2008, p.17)

#### *Ecuación de Freundlich*

$$qe = K_f C_e^{1/n}$$

A esta ecuación se utiliza en su forma lineal para el análisis de los datos experimentales:

#### *Ecuación de Freundlich linealizada.*

$$\log(q_e) = \log(K_f) + \frac{1}{n} \log(C_e)$$

Los parametros  $K_f$  y  $n$  son determinados al graficar  $\log(q_e)$  y  $\log C_e$

El modelo de Langmuir, en cambio, es válido para la adsorción sobre una superficie con un número finito de sitios idénticos, los cuales se consideran que están homogéneamente distribuidos sobre la superficie del adsorbente. (Foo y Hameed 2010, p.4) Se expresa de la siguiente manera:

#### *Ecuación de Langmuir*

$$qe = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e}$$

La ecuación puede ser linealizada como se muestra a continuación:

Ecuación de Langmuir forma lineal

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{b * q_{max} * C_e} + \frac{1}{q_{max}}$$

$q_{max}$  representa la capacidad de adsorción máxima del metal por la biomasa, este valor corresponde a la formación de una monocapa sobre la superficie del adsorbente, y el parámetro  $b$  refleja la afinidad del adsorbente por los iones metálicos

Donde  $b$  y  $q_{max}$  son calculados al graficar  $\left(\frac{1}{q_e}\right) = \left(\frac{1}{C_e}\right)$

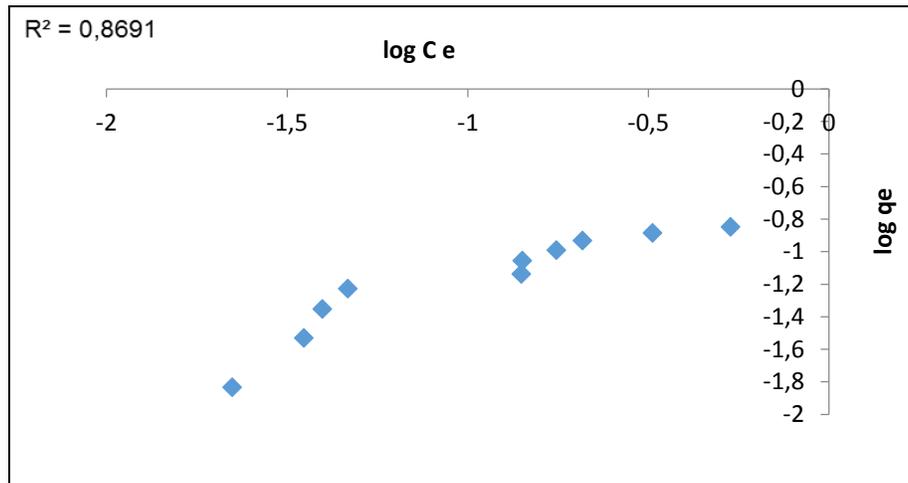
La relación lineal entre  $1/q$  y  $1/C_e$  para el Cd se muestra en el Gráfico 4-11, indicando la validación de la isoterma de adsorción de Langmuir, un análisis de la isoterma linealizada arroja como resultado una  $q_{max} = 0,6527$  mg/g

**Tabla 12-3:** Valores de la isoterma de Freundlich y Langmuir para la adsorción de Cd<sup>2+</sup>

Muestra	C <sub>i</sub> (mg/mL)	C <sub>e</sub> (mg/mL)	q <sub>e</sub> (mg/g)	Freundlich		Langmuir	
				Log C <sub>e</sub>	Log q <sub>e</sub>	1/C <sub>e</sub>	1/q <sub>e</sub>
C1	1	0,0223	0,01466	-1,6516	-1,8337	44,8430	68,1872
C2	2	0,0352	0,0294	-1,4534	-1,5305	28,4091	33,9305
C3	3	0,0396	0,0444	-1,4023	-1,3525	25,2525	22,5195
C4	4	0,0466	0,0593	-1,3316	-1,22693	21,4592	16,8631
C5	5	0,1408	0,0728	-0,8513	-1,1373	7,1023	13,7197
C6	6	0,1417	0,0878	-0,8486	-1,0561	7,0572	11,3799
C7	7	0,176	0,1023	-0,7544	-0,9898	5,6818	9,7694
C8	8	0,2079	0,1168	-0,6821	-0,93225	4,8100	8,5557
C9	9	0,3248	0,1301	-0,4883	-0,8856	3,0788	7,6847
C10	10	0,5341	0,1419	-0,2723	-0,8477	1,8723	7,0428

Realizado por: Moyano Diego, 2016

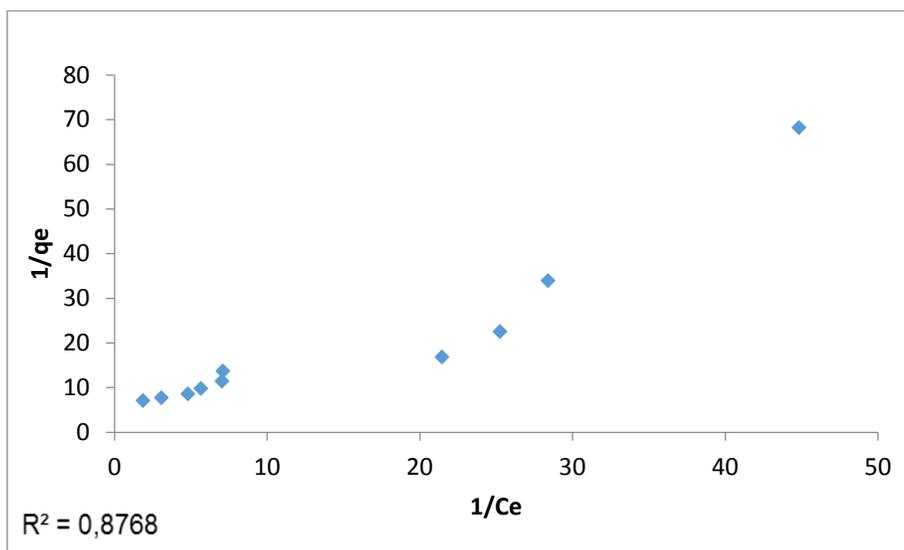
### 3.4.2.1 Isoterma de Freundlich



**Gráfico 10-3:** Isoterma de Freundlich  
Realizado por: Moyano Diego, 2016

En el Gráfico 10-3 se muestra la representación de los datos experimentales de la isoterma, de acuerdo con el modelo linealizado de la isoterma de Freundlich. Como se puede apreciar, muestra la mayor tendencia lineal tanto en bajas como en altas concentraciones de cadmio; la tendencia lineal es mucho más pronunciada cuando menor es la cantidad de adsorbente.

### 3.4.2.2 Isoterma de Langmuir



**Gráfico 11-3:** Isoterma de Langmuir  
Realizado por: Moyano Diego, 2016

**Tabla 13-3:** Resultados de adsorción de Cd

Isoterma de Langmuir				
Muestra	Ci (mg/l)	Ce (mg/l)	q(mg/g)	R <sub>L</sub>
C1	1	0,0223	0,0176	0,15407
C2	2	0,0352	0,0274	
C3	3	0,0396	0,0306	
C4	4	0,0466	0,0357	
C5	5	0,1408	0,0972	
C6	6	0,1417	0,0978	
C7	7	0,176	0,1172	
C8	8	0,2079	0,1340	
C9	9	0,3248	0,1877	
C10	10	0,5341	0,2604	

Realizado por: Moyano Diego, 2016

Con los resultados obtenidos en la adsorción de cadmio se realizó el cálculo para obtener la capacidad máxima de adsorción del andosol mediante la isoterma de Langmuir linealizada, tal como lo muestra el Gráfico 11-3, donde  $q_{\max} = 0,6527$  mg de Cd/g de andosol.

La representación de los datos experimentales, de acuerdo con el modelo linealizado de Langmuir se observa una relación lineal.

En la tabla 14-3 se resumen los distintos valores de los parámetros de Freundlich y Langmuir. La mayor correlación de los datos experimentales con el modelo de Langmuir parece indicar que el proceso de adsorción se produce a través de centros activos homogéneos y energéticamente equivalentes.

**Tabla 14-3:** Parámetros de las isothermas para la adsorción de cadmio

Langmuir		Freundlich	
$q_{max}$	0,6527	$n$	1.56079
$b$	1,2430	$K_f$	0.27289
$R^2$	0,8768	$R^2$	0,8691

Realizado por: Moyano Diego, 2016

Tomando en cuenta los coeficientes de correlación  $R^2=0.8768$  para la isoterma de Langmuir y  $R^2=0.8691$  para la isoterma de Freundlich, los modelos emanados resultaron ser buenos, considerando que:

**Tabla 15-3:** Niveles de correlación para el estudio del modelo

$0 < R^2 < 0,6$	<i>El modelo es pobre</i>
$0,6 < R^2 < 0,9$	<i>El modelo es bueno</i>
$0,9 < R^2 < 1$	<i>El modelo es muy bueno</i>

Fuente: (VILLANUEVA 2007)

La isoterma que más se ajustó a los resultados experimentales fue el modelo propuesto por Langmuir.

### 3.5 Estudios de Desorción

Los experimentos de desorción fueron realizados sobre los residuos sólidos obtenidos en el procedimiento de adsorción.

Las isotermas de desorción se obtuvieron graficando la cantidad de metal retenido en la fase sólida después del proceso de desorción en función de la concentración de equilibrio del metal en la solución, se aplicó el modelo de Langmuir considerando que es el modelo que mejor ajusto los procesos de adsorción, los valores de  $b$  y  $q_{\max}$  se especifican en las tablas para cada metal. (Leyva Ramos et al., 2002)

La cantidad de metal retenido (mg del ión metálico por g de alofán) se determinó de la diferencia entre la cantidad adsorbida  $q_{\text{ads}}$  y la cantidad desorbida  $q_{\text{des}}$  de acuerdo a la siguiente ecuación:

Concentración del soluto retenido en el proceso de desorción

$$q_d = q_{e(ads)} - \frac{C_{e(des)}}{m} * V$$

Dónde:

$q_d$  (mg/g) y  $q_{e(ads)}$  (mg /g) son las cantidades retenida y adsorbida respectivamente.  $C_{e(des)}$  (mg/L) es la concentración en equilibrio en el proceso de desorción.  $V(L)$  es el volumen de solución utilizada para el proceso de desorción y  $m(g)$  es la masa de alofán utilizada (Asci, Nurbas, & Ascikel, 2010).

El porcentaje de desorción de  $\text{Cd}^{2+}$ , se calculó de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% \text{ desorcion} = \frac{C_f}{C_i} * 100$$

Dónde:

$C_f$  es la concentración del metal en la fase acuosa en el equilibrio de desorción y  $C_i$  es la concentración del metal sorbido.

**Tabla 16-3:** Resultados de los experimentos de recuperación de Cd<sup>2+</sup> del andosol

<b>C. de metal sorbido (mg/L)</b>	<b>C. de Cd<sup>2+</sup> en equilibrio (mg/L)</b>	<b>concentración del soluto retenido qd (mg/g)</b>	<b>% metal recuperado</b>
0,9777	0,16	0,0122655	16,365
1,9648	0,2	0,026472	10,179
2,9604	0,34	0,039306	11,485
3,9534	0,83	0,046851	20,995
4,8592	0,57	0,064338	11,730
5,8583	0,56	0,0794745	9,559
6,824	0,8	0,09036	11,723
7,7921	1,03	0,1014315	13,219
8,6752	0,85	0,117378	9,798
9,4659	1,66	0,1170885	17,537

Realizado por: Moyano Diego, 2016

Los porcentajes de desorción varían de 9,55% a 20,99%.

Los resultados muestran una baja recuperación de cadmio, lo que indica que cadmio se encuentra fuertemente retenido, bajo formas no cambiables, por lo tanto la adsorción de Cd<sup>2+</sup> por los componentes del suelo a determinadas concentraciones.

## CONCLUSIONES

- En la caracterización físico-química y mediante la comparación con la tabla de criterios de calidad del suelo se puede decir no posee ningún tipo de contaminación
- Se pudo verificar que el suelo estudiado presentó un porcentaje de reducción de Cadmio entre 94,659 a 98,835%, en función a estos datos se concluye que el suelo tiene una gran capacidad de retención de cadmio que se pone en manifiesto en los ensayos de adsorción
- El efecto del pH es el factor que más influye en la capacidad de adsorción ya que a un pH alcalino existe un notable ascenso de la CIC, es decir aumenta la posibilidad del suelo para retener cationes en la superficie que está cargada negativamente. El tiempo de contacto óptimo para la adsorción fue de 60 minutos.
- La presencia de electrolitos ( $\text{NaNO}_3$ ) como fuerza iónica en la solución no influye significativamente la capacidad de adsorción de cadmio. Sin embargo se pudo observar que a menor concentración de electrolito presente en solución, mayor es la cantidad de cadmio removido de la solución.
- La cinética de adsorción de cadmio se ajusta al modelo de pseudo segundo orden, El coeficiente de correlación para dicho modelo fue 0,99457.
- De los dos modelos estudiados para describir una isoterma de adsorción puede ser descrito según el modelo de Langmuir, para el que se encuentra que la adsorción máxima es de 0,6527 mg de cadmio por gramo de andosol. Lo que permite establecer que la adsorción se solamente se realiza en una monocapa en la superficie que solo contiene un número determinado de sitios de unión
- En el proceso de desorción, los porcentajes de recuperación del metal en el suelo fueron relativamente bajos, entre 9,5 a 20,9%, lo que indica que existe una fuerte retención de cadmio en los componentes del suelo se puede considerar como un proceso irreversible o débilmente reversible.

- Esta investigación ha probado que el andosol podría ser utilizado para procesos de eliminación de cadmio en aguas contaminadas.
- Con los resultados obtenidos se puede establecer que la remoción efectiva de los contaminantes no puede atribuirse solo a la naturaleza y estructura porosa de material adsorbente, sino que también influye la naturaleza, las características física químicas del adsorbato y las condiciones a las cuales se lleva a cabo el proceso de adsorción.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda terminar con el proyecto “ESTUDIO SISTÉMICO DEL POTENCIAL DE UN ANDOSOL (Y SUS CONSTITUYENTES) DE LA PROVINCIA DE SANTO DOMINGO DE LOS TSACHILAS EN LA ADSORCION DE CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO PRESENTE EN AGUAS NATURALES”, con los siguientes parámetros: determinación del área superficial, análisis mineralógico mediante difracción de rayos X y tamaño de poro, para poder comprender mejor las interacciones adsorbato-adsorbente involucradas en los procesos.
- Realizar el estudio de la adsorción de otros metales pesados, para verificar la tendencia encontrada en el presente trabajo.
- Además de estudios con otros metales sería recomendable realizar un estudio que involucre una solución que contenga diferentes contaminantes simultáneamente, así se podría determinar el porcentaje de retención para cada metal en particular.

## BIBLIOGRAFIA

1. **ADACHI, Y. et al.** "Study of colloidal stability of allophane dispersion by dynamic light scattering." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, [en línea], 2005, (Alemania), 265(3)pp.149 - 154. [ Consulta: 16 de abril de 2016]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.01.037>
2. **ALVARADO, A. et al.** "Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el período 1931 - 2014: I Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas". *Agronomía Costarricense* [en línea], 2014, (Costa Rica), 38(1), pp.75 - 106. [Consulta: 20 abril 2016]. Diponible en: <http://www.scielo.sa.cr/pdf/ac/v38n1/a06v38n1.pdf>
3. **ARMAS-HERRERA, C.et al.** "Depth distribution of humic substances in Andosols in relation to land management and soil erosion". *Soil Use and Management*, [en línea], 2013, (Inglaterra), 29(1), pp. 77 – 86. [Consulta: 20 abril 2016]. Diponible en: <http://doi:10.1111/sum.12013>
4. **BERNARD, A.** "Cadmium & its adverse effects on human health". *Indian J Med Res* [en línea], 2008, (Belgica), 128(1), pp.558-564. [Consulta: 18 de abril de 2016] Disponible en: <http://medind.nic.in/iby/t08/i10/ibyt08i10p557.pdf>
5. **BI, E.et al.** "Sorption of heterocyclic organic compounds to reference siol: column studies for process identification". *Environ. Sci. Technol*, [en línea], 2006 (Alemania), 40(19), pp. 5962-5970. [Consulta: 18 de abril de 2016] Disponible en: 10.1021/es060470e

6. **BUYTAERT, W. et al.** "Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use". *Catena*, [en línea], 2007, (Ecuador), 70(1) , 143 - 154. [ Consulta 01 de abril 2016]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2006.08.003>
  
7. **CABEZA, R. et al.** "Evaluación de la retención de cobre en tres andisoles y un alfisol del sur de Chile". *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, [en línea], 2005 (Chile) 5(1), pp. 8 - 14. [ Consulta 16 de abril 2016]. Disponible en: [http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0718-27912005000100002&script=sci\\_abstract](http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0718-27912005000100002&script=sci_abstract)
  
8. **CAMPOS, Eduardo.** "Estudio de la adsorción de cromo hexavalente utilizando como biomaterial la ectodermis de opuntia" *Quivera*, [en línea], 2008, (Mexico) 10(1), pp. 17-18. [Consulta: 18 de abril de 2016], Disponible en: <http://biblat.unam.mx/es/revista/quivera-toluca-edo-mex/articulo/estudio-de-la-adsorcion-de-cromo-hexavalente-utilizando-como-biomaterial-la-ectodermis-de-opuntia>
  
9. **CHAVEZ LIMA, G..** *Procesos de sorción de plomo en suelos arcillosos de la región amazónica ecuatoriana*. [en línea]. (Tesis) (Pregrado). Universidad Internacional SEK. Facultad de Ciencias Ambientales, Quito-Ecuador. 2003. pp. 109-111. [Consulta: 2016-05-25]. Disponible en: [repositorio.uisek.edu.ec/jspui/handle/123456789/445](http://repositorio.uisek.edu.ec/jspui/handle/123456789/445)
  
10. **CHESWORTH, W.** *Encyclopedia of soil science*. [en línea] University of Guelph. Ontario-Canadá: Springer, 2008, pp. 64-65. [Consulta: 05-04-2016]. Disponible en: [link.springer.com/referencework/10.1007%2F978-1-4020-3995-9](http://link.springer.com/referencework/10.1007%2F978-1-4020-3995-9)
  
11. **CONTRERAS, J. et al.** "Determinación de metales pesados en aguas y sedimentos del río Haina". *Ciencia y Sociedad*, [en línea], 2004, (República Dominicana) 29(1), pp.38-45. [Consulta: 11 de abril de 2016]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/870/87029103.pdf>

12. **COVIAN SANCHEZ, Ignacio.** *Síntesis de zeolita 13x para su uso en detergentes.* (Tesis). (Doctoral), [en línea], Universidad Complutense de Madrid, Madrid- España. 1991. pp. 10-13. [Consulta: 2016-04-12]. Disponible en: <http://biblioteca.ucm.es/tesis/19911996/X/0/X0018201.pdf>
  
13. **D’ALESSANDRO W. et al.** "Fluorine adsorption by volcanic soils at Mt. Etna", *Applied Geochemistry*, [en línea], 2012, (Italia) 27(6), pp. 1179 - 1188. [Consulta: 11 de abril de 2016]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.02.028>
  
14. **DURUIBE, J. et al.**, "Contaminación de Metales Pesados y Efectos Biotóxicos Humanos". *International Journal of Physical Sciences*, 2007 (Nigeria) 2(5), pp. 112-113. [Consulta: 15 de abril de 2016]. Disponible en: [http://www.cefce.com.ar/agrupacionamu/publicaciones/documentosvarios/mineria/Contaminacion\\_de\\_Metales\\_Pesados\\_y\\_Efectos\\_Biotoxicos\\_Humanos.pdf](http://www.cefce.com.ar/agrupacionamu/publicaciones/documentosvarios/mineria/Contaminacion_de_Metales_Pesados_y_Efectos_Biotoxicos_Humanos.pdf)
  
15. **EISSA, B; et al.** "Evaluación toxicológica no invasiva del cadmio: modificaciones de biomarcadores conductuales en *Cyprinus carpio*". *Biología Acuática*, [en línea] 2003(Argentina) 1(20), pp. 57.[Consulta: 20 de Abril de 2016]. Disponible en: [http://www.academia.edu/24953844/EVALUACION\\_TOXICOLOGICA\\_NO\\_INVASIVA\\_DEL\\_CADMIO\\_MODIFICACIONES\\_DE\\_BIOMARCADORES\\_CONDUCTUALES\\_EN\\_Cyprinus\\_carpio](http://www.academia.edu/24953844/EVALUACION_TOXICOLOGICA_NO_INVASIVA_DEL_CADMIO_MODIFICACIONES_DE_BIOMARCADORES_CONDUCTUALES_EN_Cyprinus_carpio)
  
16. **ESPINOZA, J.et al.** "Sorption behavior of bensulfuron-methyl on andisols and ultisols volcanic ashderived soils: Contribution of humic fractions and mineral–organic complexes". *Environmental Pollution*, 2009 (Chile) 157(12), pp. 3387 - 3395. [Consulta: 20 de Abril de 2016]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.028>

17. **FERNÁNDEZ LINARES, L. C. et al.** *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. [En línea], México D.F.- Mexico 2006, pp 47-52. [Consulta: 20 de Abril de 2016]. Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/509.pdf>
  
18. **FLORES, J.** *Farmacología Humana*. [en línea]. 3ª. edición Barcelona- España: MASSON, 2008, pp. 1007-1009. [Consulta: 20 de Abril de 2016]. Disponible en: [https://medicinaupv.files.wordpress.com/2011/04/farmacologia\\_humana\\_-\\_florez\\_spa.pdf](https://medicinaupv.files.wordpress.com/2011/04/farmacologia_humana_-_florez_spa.pdf)
  
19. **GARZA GONZÁLEZ, M. T. et al.** "Estudio cinético e isotermas de adsorción de Ni(II) y Zn(II) utilizando biomasa del alga chlorella sp. inmovilizada". *CIENCIA UANL*, [En línea], 2008 ( Mexico) 9(2), pp. 168-172. [Consulta: 20 de Abril de 2016]. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/1876>
  
20. **CARTER M. R.; & GREGORICH E. G.,** *Soil Sampling and Methods of Analysis*, [en línea], Nova Scotia-Canadá, 2008, pp. 743-759. [Consulta: 20 de Abril de 2016]. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=54lYLSV49zIC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Soil+Sampling+and+Methods+of+Analysis&ots=K2lO\\_HM-vR&sig=OR3wcJeP6T1lJCE8dnQAcgEptK8#v=onepage&q=Soil%20Sampling%20and%20Methods%20of%20Analysis&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=54lYLSV49zIC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Soil+Sampling+and+Methods+of+Analysis&ots=K2lO_HM-vR&sig=OR3wcJeP6T1lJCE8dnQAcgEptK8#v=onepage&q=Soil%20Sampling%20and%20Methods%20of%20Analysis&f=false)
  
21. **HENRÍQUEZ, M. et al.** "Determinación de la capacidad de intercambio catiónico en arena y caolín usando acetato de amonio, acetato de sodio y cloruro de amonio" *Bioagro*, [en línea] 2005 (Venezuela) 17(1), pp. 59-60. [Consulta: 20 de Abril de 2016]. Disponible en: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-33612005000100008](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612005000100008)

22. **IGBERASE, E. et al.** "The adsorption of copper (II) ions by polyaniline graft chitosan beads from aqueous solution: Equilibrium, kinetic and desorption studies". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [en línea], 2014 (South Africa) 2(1), pp. 364-368. [Consulta: 5 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2014.01.008>
23. **ISHIGURO, M. et al.** "Sulfate adsorption on a volcanic ash soil (allophanic Andisol) under low pH conditions". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*", [en línea], 2011 ( Japón) 384(1), pp. 121-125. [Consulta: 7 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.03.040>
24. **KAUFHOLD, Stephan et al.** "Allophane compared with other sorbent minerals for the removal of fluoride from water with particular focus on a mineable Ecuadorian allophane." *Applied Clay Science* [en línea], 2010, Alemania 50(1), pp. 25 - 33. [Consulta: 17 de marzo 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01691317>
25. **KAUFHOLD, Stephan et al.** "A new massive deposit of allophane raw material in Ecuador". *Clays and Clay Minerals*, [en línea] (2010) Alemania 57(1), pp. 75–78. [Consulta: 20 de marzo 2016]. Disponible en: DOI: 10.1346/CCMN.2009.0570107
26. **KAUFHOLD, Stephan et al.** "Quantification of allophane from Ecuador". *Clays and Clay Minerals*, [en línea], 2010 (Alemania) 58(5), pp. 707 - 716. [Consulta: 2 de mayo de 2016]. Disponible en: DOI: 10.1346/CCMN.2010.0580509
27. **LANDAETA, A et al.** "Caracterización de la fracción mineral de suelos derivados de cenizas volcánicas de la cordillera de Tamalanca, Costa Rica". *Agronomía costarricense*, [en línea], 1978, (Costa Rica) 2(2), pp. 117 - 129. [Consulta: 2 de mayo de 2016]. Disponible en: [http://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v02n02\\_117.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_agr/v02n02_117.pdf)

28. **LAZO, J. C., et al.** "Empleo de arcillas modificadas para la adsorción de fenol presente en soluciones acuosas". *Revista de la Sociedad Química del Perú*, [en línea], 2007 (Perú) 73(3), pp. 167. [Consulta: 17 de marzo de 2016]. Disponible en: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1810-634X2007000300006](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2007000300006)
29. **LEYVA, R. et al.** "Adsorción de salicilato de sodio en solución acuosa sobre carbón activado". *Journal of the Mexican Chemical Society*, [en línea], 2008 (Mexico) 46(1), pp. 160-161. [Consulta: 17 de abril de 2016]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47546214>
30. **MAHOMOOD, T., et al.** "Comparison of Different Methods for the Point of Zero Charge Determination of NiO". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, [en línea], 2011 (USA) 50(17), pp. 10017-10023. [Consulta: 17 de abril de 2016]. Disponible en: DOI: 10.1021/ie200271d
31. **MURILLO, Y. et al.** "Determinación De La Cinética De Adsorción De 2,4-Dinitrofenol En Carbonizado De Hueso Bovino Por Espectrofotometría Uv-Vis". *REVISTA COLOMBIANA DE QUÍMICA*, [en línea], 2011 (Colombia) 40(1), pp. 97-101. [Consulta: 17 de abril de 2016]. Disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/23151/28390>
32. **ORDOÑEZ VINUEZA, J. L., & MORENO FARFAN, R.** *Estudio del aprovechamiento de residuos orgánicos de cultivos de flores(tallos de rosa) como biosorbente de cadmio para el tratamiento de aguas residuales.*(Tesis) (Pregrado), Universidad Politecnica Salesiana. Cuenca - Ecuador, 2013, pp. 42-46.
33. **PAREDES DOIG, A. L.** *Estudio de la adsorción de compuestos aromáticos mediante carbón activado preparado a partir de la cascara de castaña.*(Tesis) (Pregrado), [en línea], Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima - Perú, 2011, pp. 70. [Consulta: 17 de abril de 2016]. Disponible en: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/827>

34. **PÉREZ, A., et al.** "Estudio de la adsorción de Cu y Zn en andosoles de las islas canarias". *Anales de edafología y agrobiología*, [en línea], 1980 (España) 39(56), pp. 946 - 956. [Consulta: 17 de abril de 2016]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/21010>
35. **PINILLA, M. R.**, *Estudio de las propiedades estructurales y electrónicas de muestras de suelos agrícolas del tolima, utilizando la difracción de rx y la espectrometría mössbauer.* (Tesis) (Maestría), [en línea], Universidad del Tolima, Tolima-Colombia, 2012, pp. 36-39 [Consulta: 15 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://repository.ut.edu.co/handle/001/1261>
36. **QUI, H. et al**, "Critical review in adsorption kinetic models". *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, [en línea] 2009 (China) 10(5), pp. 716-724. [Consulta: 15 de mayo de 2016]. Disponible en: doi: 10.1631/jzus.A0820524
37. **RAO, K.; et al.** "Review on cadmium removal from aqueous solutions". *International Journal of Engineering, Science and Technology*, [en línea], 2010 (India) 2(7), pp. 81-103. [Consulta: 05 de abril de 2016], Disponible en: [www.ijest-ng.com/vol2\\_no7/ijest-ng-vol2-no7-pp81-103.pdf](http://www.ijest-ng.com/vol2_no7/ijest-ng-vol2-no7-pp81-103.pdf)
38. **REALPE, Suelen**, *Estudio de la contaminación del agua por productos fabricados a base de PVC usando espectroscopia de absorcion atomica.* (Tesis) (Pregrado), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas. Riobamba-Ecuador. 2009, pp. 34-36
39. **RIVAS, C. et al.** "Isotermas de Langmuir y freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO<sub>3</sub>". *SABER.*, [en línea], 2014 (Venezuela) 26(1), pp. 43-49. [Consulta: 28 de marzo de 2016], Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427739465008>

40. **ROBLES GONZÁLEZ, I. et al.** "Comportamiento adsorptivo-desorptivo del lindano en un suelo agrícola". *Interciencia*, [en línea], 2006 (Venezuela) 31(4), pp. 306-307. [Consulta: 15 de enero de 2016], Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/339/33911511.pdf>
41. **ROMERO, A.; & GALÁN, E.** "Contaminación de Suelos por Metales Pesados". *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, [en línea], 2008 (España) pp. 48-60. [Consulta: 08 de junio de 2016], Disponible en: [http://www.ehu.es/sem/macla\\_pdf/macla10/Macla10\\_48.pdf](http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf)
42. **SHOJI, Sadao et al.** *Volcanic ash soils genesis, properties and utilization*. Amsterdam-Paises Bajos: Elsevier Science Publishers, [en línea], 1993, pp. 4-17. [Consulta: 25 de mayo de 2016], Disponible en: [http://store.elsevier.com/Volcanic-Ash-Soils/S\\_-Shoji/isbn-9780444897992](http://store.elsevier.com/Volcanic-Ash-Soils/S_-Shoji/isbn-9780444897992)
43. **SANDOVAL, O. et al.** "Identificar las fracciones de aluminio en un andosol del estado de Hidalgo, México". *Revista de la Sociedad Geológica de España*, [en línea], 2008 (España) 21(1), pp.3-4. [Consulta: 14 de abril de 2016], Disponible en: [http://www.sociedadgeologica.es/archivos/REV/21\(3-4\)/art03.pdf](http://www.sociedadgeologica.es/archivos/REV/21(3-4)/art03.pdf)
44. **SALTOS MONCAYO, J. A.** "*Caracterización de la Acidez de Suelos Volcanicos del Ecuador*". (tesis) (Maestría) [en línea], Universidad Central de Venezuela, Maracay-Venezuela. (1990). pp. 35-42. [Consulta: 14 de abril de 2016], Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?id=TZMzAQAAMAAJ&pg=PR5-IA5&lpg=PR5-IA5&dq=Caracterizacion+de+la+Acidez+de+Suelos+Volc%C3%A1nicos+del+Ecuador&source=bl&ots=abgjtMVVG6&sig=YY365vhCADYdZ7n6Ey\\_5UTa\\_Qyg&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiUn5iNj7rQAhVGLSYKHZaVD24Q6AEIHjAB#v=onepage&q=Caracterizacion%20de%20la%20Acidez%20de%20Suelos%20Volc%C3%A1nicos%20del%20Ecuador&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=TZMzAQAAMAAJ&pg=PR5-IA5&lpg=PR5-IA5&dq=Caracterizacion+de+la+Acidez+de+Suelos+Volc%C3%A1nicos+del+Ecuador&source=bl&ots=abgjtMVVG6&sig=YY365vhCADYdZ7n6Ey_5UTa_Qyg&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiUn5iNj7rQAhVGLSYKHZaVD24Q6AEIHjAB#v=onepage&q=Caracterizacion%20de%20la%20Acidez%20de%20Suelos%20Volc%C3%A1nicos%20del%20Ecuador&f=false)

45. **TAN, W. et al.** "Determination of the point of zero charge of manganese oxides with different methods including an improved salt titration method". *Soil Science*, [en línea]. 2008 (CHINA) 173(4). pp. 277 - 286. [Consulta: 14 de abril de 2016], Disponible en: DOI: 10.1097/SS.0b013e31816d1f12
46. **TAYUPANDA, S.** *Diseño de un sistema de tratamiento de agua residual del porceso de pelambre para su reutilizacion.* (tesis) (Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas. Riobamba-Ecuador. (2010), pp. 26
47. **UNUABONAH, E. et al.** "Adsorption of Pb (II) and Cd (II) from aqueous solutions onto sodium tetraborate-modified Kaolinite clay: Equilibrium and thermodynamic studies". *Elsevier*, [en línea]. 2008. (China) 93(2), pp. 1-9. [Consulta: 12 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.02.009>
48. **VILLANUEVA, C.** *Biosorcion de cobre (ii) por biomasa pretratada de cascara de citrus sinensis y opuntia ficus.* [en línea] (tesis).(Pregrado) Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima- Perú. 2007, pp 56-57. [Consulta: 05 de junio de 2016]. Disponible en: [http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/2112/1/Villanueva\\_hc.pdf](http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/2112/1/Villanueva_hc.pdf)
49. **WOIGNIER, T. et al.** "Role of allophanes in the accumulation of glomalin-related soil protein in tropical soils (Martinique, French West Indies)". *European Journal of Soil Science*, [en línea], 2014 (Francia) 65(1), pp. 531-535. [Consulta: 14 de abril de 2016], Disponible en: DOI: 10.1111/ejss.12151
50. **WOIGNIER, T. et al.** "Sequestration of chlordecone in the porous structure of an andosol and effects of added organic matter: an alternative to decontamination". *European Journal of Soil Science*, [en línea], 2012 (Francia) 63(5), pp. 717 – 723. [Consulta: 14 de abril de 2016], Disponible en: DOI: 10.1111/j.1365-2389.2012.01471.x
51. **ZEHETNER, F. et al.**, "Pedogenesis of Volcanic Ash Soils in Andean Ecuador". *Soil Science Society of America*, [en línea], 2003 (USA) 67(1), pp. 1797–1801. [Consulta: 25 de mayo de 2016], Disponible en: doi:10.2136/sssaj2003.1797

## ANEXOS

### ANEXO A: Lugar de muestreo del Andosol

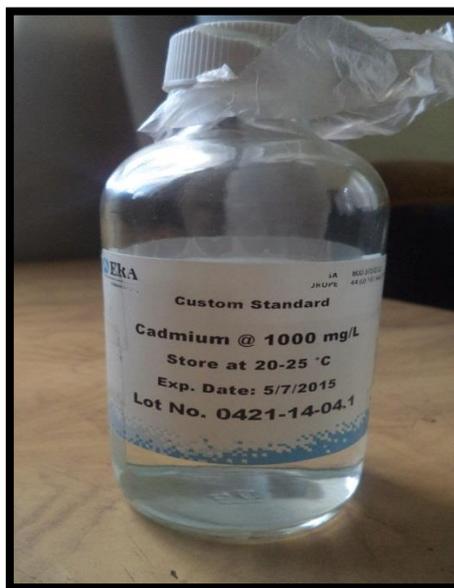


### ANEXO B: Toma de muestras de Andosol



## ANEXO C: Reactivos

a) *Solución Estándar de cadmio (1 000 mg. L<sup>-1</sup>)*



b) *Nitrato de Sodio (NaNO<sub>3</sub>)*



c) *Reactivos utilizados para regular el Ph*



ANEXO D: Materiales y Equipos

a) **Balanza Analítica**



**b) pH metro**



**c) Mufla para el secado del suelo**



**d) Centrifuga**



**e) Balón de Aforo, frascos estériles**



f) Filtros de 13 mm membrana hidrófoba de PTFE de tamaño de poro 0,22  $\mu\text{m}$

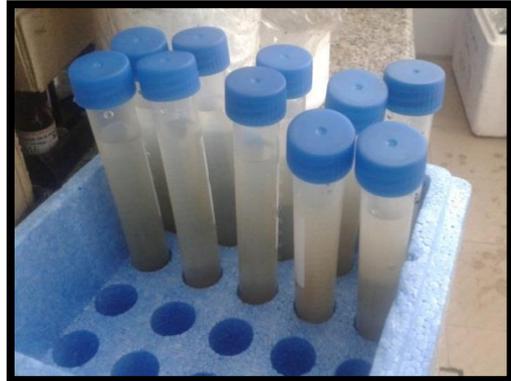
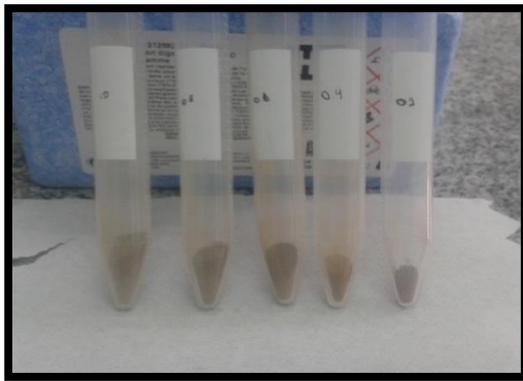


ANEXO E: Determinación del Punto de Carga Cero (PCC)



ANEXO F: Estudio de adsorción de Cadmio







## ANEXO G: Resultados de laboratorio

	<b>CENTRO DE SERVICIOS TÉCNICOS Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA AMBIENTAL</b> <b>DEPARTAMENTO :</b> <b>LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL E INSPECCIÓN (LABCESTTA)</b> Panamericana Sur Km. 1 ½, ESPOCH (Facultad de Ciencias) RIOBAMBA - ECUADOR Telefax: (03) 3013183	<b>LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL OAE</b>  <b>ACREDITACIÓN N° OAE LE 2C 06-008</b>

**INFORME DE ENSAYO No:** 297  
**ST:** 13- 16 ANÁLISIS DE SUELOS  
**Nombre Peticionario:** N.A.  
**Atn.** Diego Moyano  
**Dirección:** Parroquia San Gerardo, Barrio Central  
 Guano - Chimborazo  
  
**FECHA:** 17 de Marzo del 2016  
**NUMERO DE MUESTRAS:** 1  
**FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:** 2016/03/04 - 16:00  
**FECHA DE MUESTREO:** 2016/03/05 - 11:00  
**FECHA DE ANÁLISIS:** 2016/03/04 - 2016/03/17  
**TIPO DE MUESTRA:** Suelo  
**CÓDIGO LABCESTTA:** LAB-S 032-16  
**CÓDIGO DE LA EMPRESA:** NA  
**PUNTO DE MUESTREO:** Santo Domingo  
**ANÁLISIS SOLICITADO:** Físico- Químico  
**PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA:** Diego Moyano  
**CONDICIONES AMBIENTALES:** T máx.:25.0 °C. T min.: 15.0 °C

### RESULTADOS ANALÍTICOS:

PARÁMETROS	MÉTODO /NORMA	UNIDAD	RESULTADO	INCERTIDUMBRE (k=2)	VALOR LÍMITE PERMISIBLE (■)
Potencial de Hidrógeno	PEE/LABCESTTA/24 EPA 9045 D	Unidades de pH	6,60	±0,4	-
Conductividad Eléctrica	PEE/LABCESTTA/85 EPA 9045 D	uS/cm	17,58	±13%	-
*Carbono Orgánico Total	PEE/LABCESTTA/160 Oxidación Humeda / Walkley &Black	%	1,05	-	-
*Humedad	PEE/LABCESTTA/80 ASTM D4959	%	47,11	-	-
*Densidad real	Gravimétrico	g/ml	1,05	-	-
*Capacidad intercambio catiónico	PEE/LABCESTTA/90 Absorción atómica	meq/100g	13,24	-	-
Cadmio	PEE/LABCESTTA/76 EPA SW- 846 N 3050B, 7130	mg/Kg	<0,8	±23%	-
Níquel	PEE/LABCESTTA/77 EPA SW- 846 N 3050B, 7520	mg/Kg	<20	±12%	-
Plomo	PEE/LABCESTTA/78 EPA SW- 846 N 3050B, 7420	mg/Kg	<30	±38%	-

Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.  
 Los resultados arriba indicados sólo están relacionados con los objetos ensayados  
**MC01-23**

Página 1 de 2  
 Edición 1

	<p style="text-align: center;"><b>CENTRO DE SERVICIOS TÉCNICOS Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA AMBIENTAL</b></p> <p style="text-align: center;">DEPARTAMENTO : <b>LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL E INSPECCIÓN (LABCESTTA)</b></p> <p style="text-align: center;">Panamericana Sur Km. 1 ½, ESPOCH (Facultad de Ciencias) RIOBAMBA - ECUADOR Telefax: (03) 3013183</p>	<p style="text-align: center;"><b>LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL OAE</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ACREDITACIÓN Nº OAE LE 2C 06-008</b></p>
---	--	--

*Textura	PEE/LABCESTTA/100 Densímetro Bouyoucos	%	Arena		-	-
			Arena	94,0		
			Arcilla	3,1		
			Limo	2,9		

**OBSERVACIONES:**

- Muestra receptada en el laboratorio.
- Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.

**RESPONSABLE DEL INFORME:**

  
 Dr. Mauricio Alvarez  
**RESPONSABLE TÉCNICO**