



**Fundamentos para el estudio, identificación y determinación metodológica de la capacidad de intercambio catiónico una propuesta para suelos asociados al cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en el departamento del Valle del Cauca**

**Julián Andrés Guevara Pescador**

Universidad Nacional Abierta y a Distancia  
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería

Palmira, Colombia

2017

**Fundamentos para el estudio, identificación y determinación  
metodológica de la capacidad de intercambio catiónico una propuesta  
para suelos asociados al cultivo de caña de azúcar (*Saccharum  
officinarum* L.) en el departamento del Valle del Cauca**

**Julián Andrés Guevara Pescador**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito para optar al título

de:

**Químico**

Director (a):

Rafael Andrés Ramírez Alvarado

Ingeniero agrónomo Msc. en ingeniería agrícola

Línea de Investigación:

Análisis y síntesis química

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería

Palmira, Colombia

2017

*(Dedicatoria)*

*Dedico mi trabajo a:*

*Dios por darme fuerza, sabiduría, paciencia y sobre todo buena salud para seguir adelante en mi camino.*

*A mi madre Noemí por su amor, apoyo incondicional y por hacer de mí un gran hombre.*

*A mi esposa Vanessa por su compañía y motivación día a día.*

*A todos mis amigos, compañeros de estudio, tutores y maestros, y a todos quienes sin su colaboración nunca hubiese podido culminar este proyecto.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Rafael Andrés Ramírez Alvarado por sus enseñanzas, su invaluable apoyo, orientación, compromiso y dedicación en la realización de esta monografía.

Finalmente quiero agradecer a todas las personas que contribuyeron de una forma u otra a la elaboración de esta investigación. Por otra parte, agradecer aquellas personas con las que alguna vez compartí durante el transcurso de la carrera y quienes me brindaron su amistad; y por supuesto a todos mis profesores por compartir sus conocimientos a lo largo de esta gran experiencia.

## RESUMEN

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), es una propiedad que varía ampliamente con los diferentes tipos de suelos, situación que hace necesario contar con metodologías que permitan evaluar de forma efectiva esta propiedad con el fin de emitir conceptos e indicaciones acertadas para los diferentes productores agrícolas en el Valle del Cauca – Colombia. La caña de azúcar se cultiva con éxito en la mayoría de suelos, pero los más adecuados son aquellos que cumplan con las condiciones físicas, químicas y biológicas adecuadas para lograr el mayor crecimiento, rendimiento y calidad de la caña de azúcar. Mediante esta revisión se recopilieron conceptos y métodos de análisis fisicoquímico de suelos que permiten abordar con mayor claridad problemas actuales del suelo, como lo son el deterioro y degradación, generando posibles alternativas de manejo de acuerdo con el estado de fertilidad y el movimiento de nutrientes de los suelos.

**Palabras clave:** Acetato de amonio, Acetato de sodio, fertilidad, pH.

## ABSTRACT

Cation Exchange Capacity (CEC) is a property that varies widely with the different types of soils, a situation that makes it necessary to have methodologies that allow an effective evaluation of this property in order to emit concepts and appropriate indications for the different producers in Valle del Cauca – Colombia. Sugar Cane is successfully grown in most soils, but the most suitable are those that comply the appropriate physical, chemical and biological conditions to achieve the highest growth, yield and quality of sugarcane. This review compiled concepts and methods of physicochemical analysis of soils that allow us to deal more clearly with current soil problems, such as deterioration and degradation, generating possible management alternatives according to the fertility status and nutrient movement of soils.

**Keywords:** Ammonium acetate, Sodium acetate, fertility, pH.

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b>JUSTIFICACION</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
2.1	Objetivo general.....	12
2.2	Objetivos especificos .....	12
<b>3</b>	<b>MARCO CONCEPTUAL Y TEORICO</b> .....	<b>13</b>
3.1	El suelo y su capacidad de intercambio catiónico.....	16
3.2	Teorías del intercambio iónico .....	21
3.2.1	Teoría de la red cristalina .....	21
3.2.2	Teoría de la membrana semipermeable .....	22
3.2.3	Teoría de la doble capa eléctrica difusa .....	23
<b>4</b>	<b>MATERIALES Y METODOS</b> .....	<b>26</b>
4.1	Metodología empleada .....	26
<b>5</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSION</b> .....	<b>28</b>
5.1	Relación de algunas propiedades fisicoquímicas con el comportamiento de la Capacidad de Intercambio Cationico .....	36
5.2	Metodos para la determinacion de CIC existentes.....	38
5.2.1	Medición de la CIC a un pH diferente del pH del suelo (medio amortiguado).....	39
5.2.1.1	Determinación de la CIC a pH 8.2 .....	40
5.2.1.2	Determinación de la CIC a pH 7 .....	42
5.2.1.3	Determinación de la CIC al pH del suelo .....	43
5.2.1.4	Determinación de la CIC por colorimetría .....	44
5.2.1.5	Determinación de la CIC por el método de BaCl <sub>2</sub> en presencia de un buffer de trietanolamina a pH 8.1 .....	45
5.2.1.6	Determinación de la CIC por el método de intercambio compulsivo con BaCl <sub>2</sub> .....	46
5.2.2	Medición de la CIC al pH del suelo (medio no amortiguado).....	47
5.2.2.1	Determinación de la CIC por el método de BaCl <sub>2</sub> y MgSO <sub>4</sub> .....	47
5.2.2.2	Determinación de la CIC por el método de Cloruro de Hexaminocobaltato .....	48
5.2.2.3	Determinación de la CIC por el método de azul de metileno.....	49
5.3	Método propuesto para el análisis de la CIC en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar para la región del Valle del Cauca – Colombia.....	51
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>56</b>

<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>57</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>58</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de la fertilidad de suelos de acuerdo a la CIC. ....	14
<b>Tabla 2.</b> Factores que afectan a la capacidad del suelo para suministrar los nutrientes a la planta.....	15
<b>Tabla 3.</b> Capacidad de intercambio catiónico para diferentes texturas de suelo. ....	15
<b>Tabla 4.</b> Secuencias de selectividad catiónica de varios coloides.....	20
<b>Tabla 5.</b> Capacidad de intercambio de cationes de varios coloides. ....	20
<b>Tabla 7.</b> Fuentes de consulta. ....	27
<b>Tabla 8.</b> Revisión Bibliográfica .....	28
<b>Tabla 9.</b> Escalas de suelos del Valle del Cauca. ....	35
<b>Tabla 10.</b> Métodos utilizados en la determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico.....	39

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Concentración de ingenios azucareros en el departamento del Valle del Cauca. ....	13
<b>Figura 2.</b> Almacenamiento de cationes en el suelo. ....	16
<b>Figura 3.</b> Comparación de la CIC en dos suelos. ....	17
<b>Figura 4.</b> Comportamiento de la CIC en diferentes texturas del suelo. ....	18
<b>Figura 5.</b> Teoría de la red cristalina.....	22
<b>Figura 6.</b> Teoría de la membrana semipermeable.....	22
<b>Figura 7.</b> Carga negativa de las partículas de arcilla: a. seca: b. completamente hidratado .....	23
<b>Figura 8.</b> Doble capa eléctrica.....	24
<b>Figura 9.</b> Modelos esquemáticos que representan la teoría de la doble capa eléctrica según: Helmholtz, Chapman-Gouy y Stern.....	24
<b>Figura 10.</b> Metodología empleada en la revisión y elaboración de la monografía.....	26
<b>Figura 11.</b> Mecanismo de intercambio catiónico para la determinación de CIC a pH 8,2. ....	40
<b>Figura 12.</b> Mecanismo de intercambio catiónico para la determinación de CIC a pH 7. ..	42
<b>Figura 13.</b> Mecanismo de intercambio catiónico para la determinación de CIC a pH del suelo.....	43
<b>Figura 14.</b> Mecanismo de intercambio catiónico por colorimetría .....	44
<b>Figura 15.</b> Mecanismo de intercambio catiónico por el método de BaCl <sub>2</sub> . ....	45
<b>Figura 16.</b> Mecanismo de intercambio por el método de intercambio compulsivo. ....	46
<b>Figura 17.</b> Mecanismo de intercambio catiónico por el método de BaCl <sub>2</sub> y MgSO <sub>4</sub> . ....	47
<b>Figura 18.</b> Mecanismo de intercambio catiónico por el método de Cloruro de Hexamincobaltato.....	48
<b>Figura 19.</b> Molécula del Cloruro de Hexamincobaltato .....	49
<b>Figura 20.</b> Mecanismo de intercambio catiónico por el método de azul de metileno. ....	49
<b>Figura 21.</b> Determinación de la CIC por el método de azul de metileno .....	50
<b>Figura 22.</b> Metodología utilizada para la determinación de CIC en CENICAÑA .....	52
<b>Figura 23.</b> Metodología propuesta para la determinación de CIC en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca. Fase I (Saturación). ....	52
<b>Figura 24.</b> Metodología propuesta para la determinación de CIC en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca. Fase II (Intercambio).....	53
<b>Figura 25.</b> Metodología propuesta para la determinación de CIC en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca. Fase III (Cuantificación).....	54

## 1 JUSTIFICACION

La importancia de esta monografía, radica en la necesidad recopilar, identificar y evaluar de manera teórica las ventajas y desventajas de algunos métodos químicos para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en los suelos del Valle del Cauca asociados al cultivo de caña de azúcar.

Dado que en la actualidad existen numerosos métodos empleados a nivel de laboratorio, pero muchos de ellos presentan interferencias con compuestos como lo son: carbonatos de calcio y magnesio, sales solubles y materia orgánica, por lo tanto pueden generar sobrestimaciones o subestimaciones de este importante parámetro.

Por tanto la revisión, propuesta y modificación de un método de medición de la CIC específico para los suelos del Valle del Cauca, asociados al cultivo de caña de azúcar, principal sector de desarrollo del departamento, se convierte en una alternativa de investigación y desarrollo promisorio en el área de la química del suelo.

Este tipo de investigaciones, son de gran importancia nivel regional y nacional, debido a que la determinación adecuada de parámetros químicos como la CIC, permitirá a los productores, investigadores y entidades relacionadas con el sector de la caña de azúcar, conocer de forma rápida, precisa y adecuada parámetros vitales para el desarrollo del cultivo como lo son la fertilidad y disponibilidad iónica del suelo para el desarrollo de las plantas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Proponer acciones para la optimización de un método de análisis para la medición de la capacidad de intercambio catiónico, a partir de la revisión teórica de las metodologías existentes, con el fin de brindar una alternativa para mejorar la precisión en la medición de este parámetro en los suelos asociados al cultivo de caña de azúcar en la región del Valle del Cauca – Colombia.

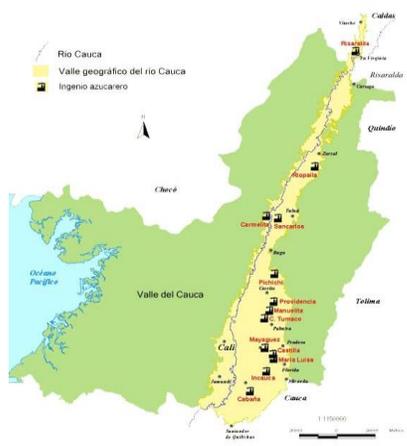
### **2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

1. Identificar la relación de algunas propiedades fisicoquímicas del suelo con el comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca.
2. Recopilar diferentes métodos empleados para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico, con el fin de facilitar el estudio y desarrollo de esta importante propiedad química en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar.
3. Analizar las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos recopilados que permita establecer cuales se adaptan mejor a las condiciones de suelo típicas del Valle del Cauca – Colombia permitiendo definir los factores a optimizar en el método seleccionado.

### 3 MARCO CONCEPTUAL Y TEORICO

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es una gramínea tropical, emparentada con el sorgo y el maíz en cuyo tallo se acumula un jugo rico en sacarosa, que al ser extraído y cristalizado forma el azúcar. La sacarosa es sintetizada por la caña gracias a la energía tomada del sol durante la fotosíntesis. El rango óptimo de temperatura para el crecimiento de la caña se encuentra entre 26 y 30 °C, el cual es ligeramente superior al promedio de temperatura en la zona azucarera de Colombia. Las temperaturas inferiores a 21 °C retardan el crecimiento de los tallos y conducen al aumento de sacarosa (Silva, 2008; Meléndez, 2012).

En el país, la producción de caña de azúcar se concentra en los departamentos del Cauca, Valle del Cauca y Risaralda dadas sus condiciones agroecológicas; la industria azucarera está concentrada en el valle geográfico del río Cauca, donde predominan los suelos de los órdenes Mollisol, Inceptisol, Vertisol, Entisol, Alfisol y Ultisol; en esta región los suelos de los municipios de Candelaria, Cerrito y Palmira son considerados los más fértiles y con mayor área sembrada en el departamento del Valle del Cauca, aproximadamente 232.070 hectáreas sembradas (Quintero, 1995; Vargas, 2012; Peñarete, 2012).



**Figura 1.** Concentración de ingenios azucareros en el departamento del Valle del Cauca. (Fuente: [http://www.cenicana.org/pictures/quienes\\_somos/map\\_region\\_azucarera.jpg](http://www.cenicana.org/pictures/quienes_somos/map_region_azucarera.jpg))

En la última década en la región Vallecaucana los ingenios azucareros, han reducido de manera significativa el uso de los fertilizantes minerales y pesticidas, y se ha incrementado la aplicación de compost y/o biosólidos como enmienda orgánica para incrementar la fertilidad del suelo y por ende su capacidad de intercambio catiónico (Vargas, 2012). El compost como acondicionador orgánico natural mejora a mediano y largo plazo las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, incrementa la porosidad, disminuye la densidad aparente,

consolida la estructura y consistencia, aumenta la capacidad de intercambio catiónico, capacidad buffer, la concentración de algunos nutrientes esenciales y la actividad biológica del suelo (Bohórquez, 2014). Alternativamente, la utilización de biosólidos previamente estabilizados, ha ido en aumento como fuente principal de nutrientes en diversos cultivos y de materia orgánica para la fertilidad de los suelos y recuperación de los mismos (Meléndez, 2012).

Diversas investigaciones concluyen que la capacidad de intercambio catiónico es una de las propiedades químicas del suelo más importante, dado que es un buen indicador de la fertilidad en los suelos. Es por ello que se debe responder de manera adecuada y oportuna a la necesidad de preservar y conservar la capacidad productiva y se desarrollen tecnologías que conduzcan a conservar y mejorar los suelos aplicando principios de sostenibilidad mediante prácticas que contribuyan al mejoramiento de la calidad de los mismos (Gómez, 2015). La fertilidad de los suelos se puede clasificar de acuerdo con los resultados analíticos obtenidos con métodos apropiados tanto en suelos ácidos como alcalinos en las siguientes tablas (Fernández, 2006):

**Tabla 1.** Clasificación de la fertilidad de suelos de acuerdo a la CIC.

<b>Clase</b>	<b>CIC (cmol(+) kg<sup>-1</sup>)</b>
Muy Alta	>40
Alta	25-40
Media	15-25
Baja	5-15
Muy Baja	>5

Fuente: Fernández, 2006.

**Tabla 2.** Factores que afectan a la capacidad del suelo para suministrar los nutrientes a la planta.

<b>Aumentan la fertilidad</b>	<b>Disminuye la fertilidad</b>
Alto contenido de arcilla	Alto contenido de arena
Alto contenido de humus	Perdida de materia orgánica
Buena estructura	Compactación
Suelo caliente	Suelo frío
Suelo profundo	Suelo poco profundo
Suelo húmedo	Suelo seco o mojado
Buen drenaje	Exceso de riego y drenaje
Fertilización	Erosión
Microbios deseables	Plagas perjudiciales de la raíz
Cerca del pH neutral	pH demasiado ácido o alcalino

Fuente: Vargas, 2007.

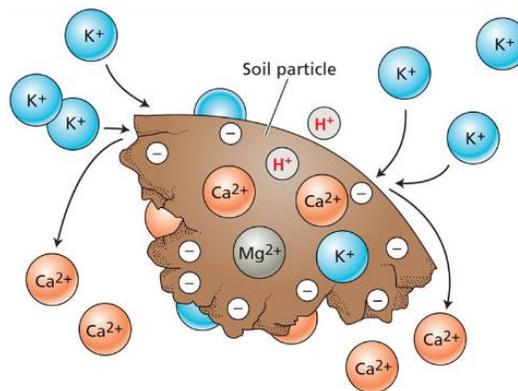
**Tabla 3.** Capacidad de intercambio catiónico para diferentes texturas de suelo.

<b>Textura de suelo</b>	<b>CIC (meq/100 g suelo)</b>
Arenas (color claro)	3-5
Arenas (color oscuro)	10-20
Francos	10-15
Franco Limoso	15-25
Arcilla y Franco Arcilloso	20-50
Suelos Orgánicos	50-100

Fuente: Fernández, 2006.

### 3.1 El suelo y su capacidad de intercambio catiónico

Los suelos pueden ser considerados como almacenes de nutrientes para las plantas, muchos nutrientes, como el calcio y el magnesio, pueden suministrarse a las plantas únicamente a partir de las reservas mantenidas en el suelo. Otros como el potasio se añaden regularmente a los suelos como fertilizante con el fin de ser removido según sea necesario por los cultivos. La capacidad relativa de los suelos para almacenar un grupo particular de nutrientes en este caso los cationes, se denomina capacidad de intercambio catiónico o CIC (Mengel, 1993).



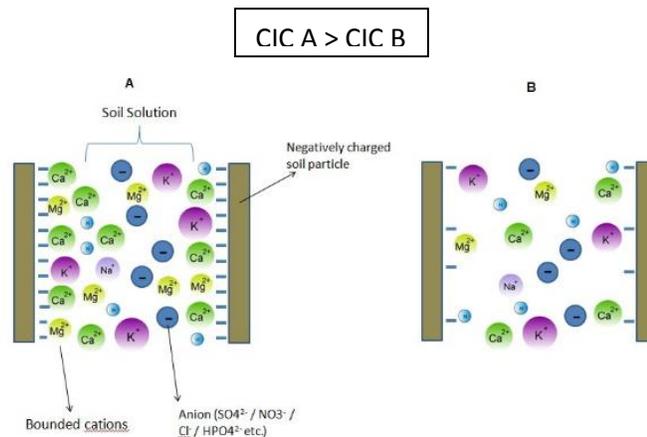
**Figura 2.** Almacenamiento de cationes en el suelo. (Fuente: <http://slideplayer.es/slide/2269432/>)

El suelo se define como un sistema abierto, dinámico, constituido por tres fases: la fase sólida está formada por los componentes inorgánicos y los orgánicos, que dejan espacios entre las partículas del suelo (poros, cámaras, galerías, grietas y otros) en el que se hallan las fases líquida y gaseosa (principalmente oxígeno y dióxido de carbono). El volumen de estos espacios entre las partículas, suele estar ocupado por agua que pueden llevar iones y sustancias en solución o suspensión, por aire y por las raíces y organismo que viven en el suelo, todos estos elementos le dan sus propiedades físicas y químicas (Ramírez, 2009).

El suelo posee una característica maravillosa: La capacidad de retener nutrientes a pesar del lavado, lo que en términos técnicos se conoce como capacidad de intercambio catiónico (CIC). Esta capacidad, de naturaleza eléctrica, impide que los nutrientes se escapen hacia lo profundo de los estratos geológicos, y se pierdan, arrastrados por la acción del agua que atraviesa el suelo. Debido a la CIC, los nutrientes se adhieren a las partículas de arcilla dentro del medio edáfico, y allí permanecen en equilibrio con los aportes recibidos de distintas fuentes, y con las pérdidas que ocurren, por ejemplo, a causa de la necesaria extracción que de ellos realizan las plantas, o por eliminación física debido a la erosión. Si el suelo no

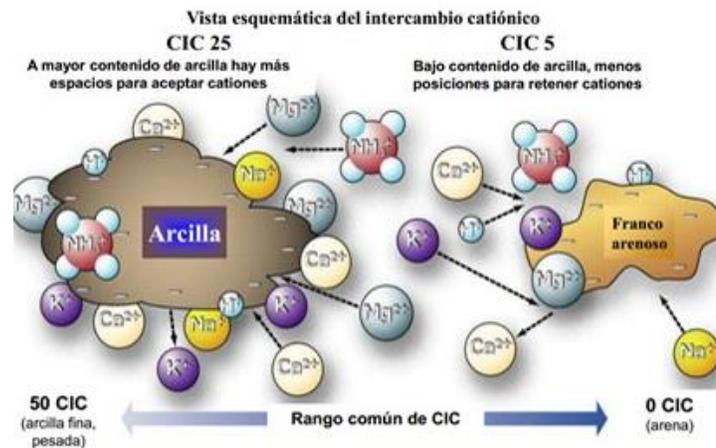
hubiese desarrollado esta capacidad de retención de nutrientes, la vida terrestre no hubiera sido posible, al menos como la conocemos ahora (León, 2004).

La capacidad de intercambio de cationes (CIC) de un suelo es una medida de la cantidad de sitios de carga negativa en la superficie del suelo que puede retener iones de carga positiva (cationes), tales como el calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ), por fuerzas electrostáticas. La distribución de estas fuerzas se puede explicar a partir del modelo de la doble capa difusa. Este modelo, sin entrar en muchos detalles, demuestra el efecto de dos fuerzas que actúan en sentido contrario, la atracción electrostática y la tendencia de los cationes a difundirse para tener así concentraciones iguales en toda la solución (Martínez, 2011). Los cationes retenidos electrostáticamente son fácilmente intercambiables con los cationes en la solución del suelo por lo que un suelo con una CIC más alta tiene una mayor capacidad para mantener cantidades adecuadas de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  que un suelo con una baja CIC. Un suelo con una CIC más alta puede no necesariamente ser más fértil debido a la CIC de un terreno también puede ser ocupado por cationes ácido tales como el hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) y aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ). Sin embargo, cuando se combina con otras medidas de la fertilidad del suelo, la CIC es un buen indicador de la calidad del suelo y la productividad (Ross, 2011; Sonon, 2014).



**Figura 3.** Comparación de la CIC en dos suelos. (Fuente: <http://www.smart-fertilizer.com/es/articles/Cation-Exchange-Capacity>)

La capacidad de intercambio catiónico, depende de la textura, el tipo de arcilla y el contenido de materia orgánica del suelo están estrechamente relacionadas con el nivel de fertilidad de los suelos, lo deseable es que ambas características sean altas, lo cual se reflejan en un alto potencial del suelo para suministrar nutrientes a las plantas (Blanco, 2003).



**Figura 4.** Comportamiento de la CIC en diferentes texturas del suelo. (Fuente: <https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-capacidad-de-intercambio-cationico-del-suelo>)

En términos generales, La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se expresa como el número de moles de iones con carga positiva adsorbidos, que pueden ser intercambiados por unidad de masa seca de suelo, actualmente existen dos unidades equivalentes, se puede expresar en centimoles de carga positiva por kilogramo,  $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$  o bien  $\text{cmolc kg}^{-1}$ , pero la unidad más común es el  $\text{meq}\cdot 100\text{g}^{-1}$  (Barrios, 2012).

Los cationes son adsorbidos o retenidos por las cargas negativas de las superficies coloidales del suelo mediante simple atracción electromagnética, lo cual, les permite resistir la remoción o lixiviación causada por el agua. Estos cationes pueden ser reemplazados o intercambiados por otros cationes presentes en la solución del suelo por efecto de la ley de acción de masas resultante de la competencia entre ellos por los sitios cargados negativamente, debido a la presencia de un gran número de iones en el complejo de cambio (Blanco, 2003).

Los cationes más comunes y numerosos retenidos en los sitios de intercambio del suelo son el  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Al}^{+3}$ . Las proporciones de estos cationes sobre las superficies coloidales cambian constantemente como consecuencia de la adición de enmiendas y fertilizantes químicos. Así mismo, la absorción de cationes por las plantas y los procesos de lixiviación que ocurren en el suelo reducen rápidamente su concentración en la solución del suelo alterando el balance nutricional del sustrato edáfico (Blanco, 2003). Por lo tanto, los cationes que son sometidos a esta retención quedan protegidos contra los procesos que tratan de evacuarlos del suelo, como la lixiviación, evitando así que se pierdan nutrientes para las plantas (Posso, 2010). Los factores que rigen el orden en el que se llevará a cabo el intercambio de cationes en los sitios de intercambio, son los siguientes:

Concentraciones relativas de la solución, Histéresis, densidad de energía de superficie, la valencia de los cationes, peso atómico, tamaño y grado de hidratación (Valencia, 2008).

Los iones presentes en la solución del suelo a través de sus campos de cargas eléctricas atraen los dipolos que forman moléculas de agua, cubriéndose así de una determinada cantidad de agua de hidratación. La fuerza de atracción de los dipolos de agua disminuye con la distancia en que estos se encuentran del centro de cargas del catión y poco a poco pasan a ser moléculas de agua libre. El agua de hidratación de los cationes alcalinos y alcalinotérreos disminuye con el aumento del diámetro del átomo. La hidratación de los cationes divalentes es mayor que la de los monovalentes. A mayor agua de hidratación, menor es la fuerza de atracción que puede ejercer un cambiador sobre un catión (Fassbender, 1975).

Las interacciones entre las cargas electropositivas de los iones y las electronegativas de los “cambiadores” aumentan bastante al elevarse el diámetro del átomo y disminuir el agua de hidratación. Se han establecido las siguientes secuencias de hidratación, llamadas también liotrópicas o de Hofmeister (Fassbender, 1975):



Esta ordenación, denominada serie liotrópica, indica que, ion por ion, un catión puede ser desplazado por cualquier otro que este situado más hacia su izquierda, con mayor densidad de carga y, por tanto, mayor fuerza de retención. La concentración en la que se encuentren los cationes en disolución también es un factor importante que puede afectar al desplazamiento catiónico, debido al desplazamiento del equilibrio. El ion  $\text{H}^+$  figura en primer lugar, es decir, es la especie con mayor capacidad desplazante (Domenech, 2006). Es necesario resaltar que el hidrogeno es adsorbido más fuertemente que los iones con mayor valencia, debido a la polaridad del agua, por eso el pH tiene una gran influencia en la CIC (Martínez, 2011).

Es difícil determinar el orden descendente de adsorción catiónica llamada serie liotrópica para cada uno de los distintos intercambiadores en general ya que depende las características del intercambiador, de las características generales del catión a intercambiar y del que será intercambiado.

Los diferentes tipos de coloides del suelo difieren en la intensidad con que se unen a los diversos cationes, esto afecta la facilidad del intercambio catiónico. Se han encontrado las siguientes secuencias de selectividad (Valencia, 2008):

**Tabla 4.** Secuencias de selectividad catiónica de varios coloides.

Coloide	Secuencia de selectividad catiónica
Illita	$Al^{+3} > K^+ > Ca^{+2} > Mg^{+2} > Na^+$
Caolinita	$Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^+ > Al^{+3} > Na^+$
Monmorillonita	$Ca^{+2} > Mg^{+2} > H^+ > K^+ > Na^+$
Materia orgánica	$Mn^{+2} > Ba^{+2} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > NH_4^+ > K^+ > Na^+$

Fuente: Valencia, 2008.

Esta selectividad se debe a características de los diferentes componentes del complejo de intercambio catiónico: superficie externa e interna; expansibilidad de los paquetes elementales de las arcillas y aumento de espacio interlaminar (Montmorillonita y Vermiculitas); dimensiones específicas del espacio interlaminar y fijación de  $NH_4^+$  y  $K^+$  (Illita), distribución geométrica de las cargas (densidad); presencia de diferentes cantidades de radicales externos en la materia orgánica (Valencia, 2008).

**Tabla 5.** Capacidad de intercambio de cationes de varios coloides.

Coloide	Capacidad de intercambio de cationes (meq/100 g de suelo)
Humus	100-300
Vermiculita (2:1)	80-150
Monmorillonita	60-100
Illita (2:1)	25-40
Caolinita (1:1)	3-15
Sesquióxidos	9-3

Fuente: Vargas, 2007.

En los procesos de intercambio catiónico toman parte dos componentes: las partículas coloidales del suelo, o sea la materia orgánica, los hidróxidos y los minerales arcillosos que funcionan como cambiadores y los cationes disueltos en la solución del suelo, que funcionan como componentes cambiables. La comprensión de los fenómenos del intercambio implica el conocimiento de las características de estos elementos (Fassbender, 1975). En los procesos del intercambio iónico se aceptan las siguientes generalizaciones (Martínez, 2011):

- Las partículas coloidales (como las arcillas) están cargadas negativamente.

- Estas partículas tienen una densidad de carga que multiplicada por la superficie específica es igual a la CIC.
- Los cationes intercambiables neutralizan la carga negativa, localizándose en la superficie o cerca de ella.
- Se considera que el proceso de intercambio iónico es estrictamente reversible.

### **3.2 Teorías del intercambio iónico**

Las causas que originan el intercambio iónico son los desequilibrios eléctricos de las partículas arcillosas. Los mecanismos del intercambio iónico son las bases que dan lugar al desarrollo de diversas teorías que explican y complementan el fenómeno de la CIC. Estas teorías son compatibles y simplemente se tratan de enfoques distintos (Martínez, 2011):

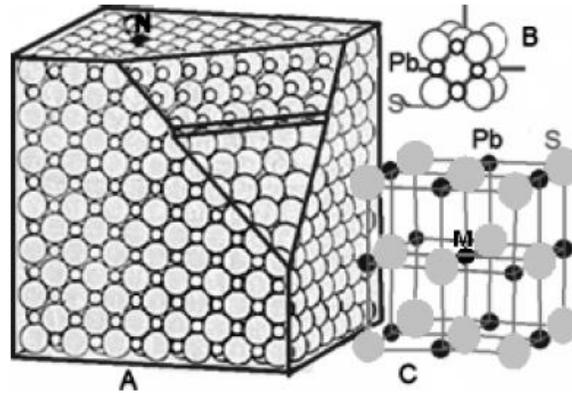
- Teoría de la red cristalina. Enfoque de iones débilmente retenidos.
- Teoría de la membrana semipermeable. Enfoque de diferentes concentraciones.
- Teoría de la doble capa eléctrica difusa. Enfoque de desequilibrios eléctricos.

#### **3.2.1 Teoría de la red cristalina**

Esta teoría considera a las partículas de los minerales de arcilla como sólidos iónicos, en los cuales hay cargas positivas y negativas, con interacciones de Coulomb entre iones y cristal. Los contraiones de los bordes de las arcillas están débilmente retenidos por lo que pueden abandonar la estructura y cambiarse con los cationes presentes en el agua salada de la formación. La facilidad con que se lleva a cabo el intercambio de iones depende de (Monsalvo, 1998; Martínez, 2011)

- Concentración del ión a intercambiar.
- Naturaleza de las fuerzas originadas.
- Carga y tamaño relativo de los iones.
- Forma de acceso de los iones a la estructura.

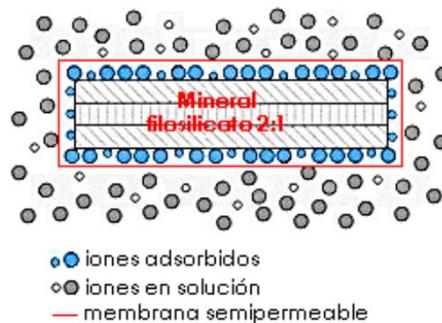
La teoría de la red cristalina se explica con la Figura 5. En esta figura, la estructura de un mineral (A) está constituida por un empaquetamiento de átomos, iones o moléculas, con determinados modelos de repetición (B y C). Cualquier ión del interior de la estructura (ión M de la Figura C) está completamente rodeado de iones de signo contrario con una determinada coordinación, de manera que su carga está compensada y el material es eléctricamente neutro (Martínez, 2011).



**Figura 5.** Teoría de la red cristalina. (Fuente: Monsalvo, 1998)

### 3.2.2 Teoría de la membrana semipermeable

En esta teoría la interfase agua – arcilla actúa como una membrana semipermeable que deja pasar a los iones de la solución electrolítica y a los adsorbidos en la superficie de las partículas sólidas; pero no a los situados en el interior del mineral de arcilla figura 6.



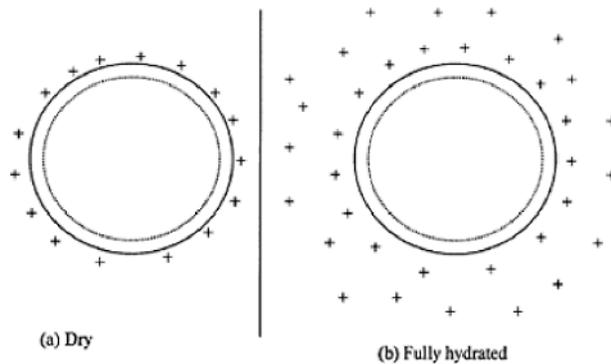
**Figura 6.** Teoría de la membrana semipermeable. (Fuente: (Martínez, 2011; Dorrnsoro, 2016).

Esta membrana semipermeable separa dos soluciones electrolíticas de diferente concentración: el agua que pasa a través de una membrana semipermeable es de

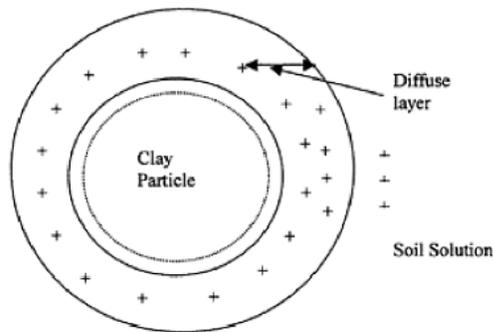
menor concentración que la que permanece en la lutita o arcilla. Como esta membrana está cargada eléctricamente los iones (cationes y aniones) se difunden a través de ella; los contraiones (cationes asociados a la superficie de la arcilla) se difunden a un ritmo más rápido que los coiones (los aniones de la solución) (Martínez, 2011; Dorronsoro, 2016).

### 3.2.3 Teoría de la doble capa eléctrica difusa

Esta última teoría, la doble capa eléctrica es una región que existe entre una partícula de arcilla y el agua de formación, y tiene una distribución particular de iones: la concentración de los contraiones es mayor cerca de la superficie arcillosa y disminuye hasta equilibrarse con la concentración de los cationes en el agua libre del efecto de la interfase agua-arcilla (Martínez, 2011). Cuando las partículas de arcilla están completamente hidratadas, la carga negativa está equilibrada por los cationes en la solución del suelo y son atraídos por las fuerzas de Coulomb (figura 7). Esta carga negativa en la superficie de la arcilla y la carga positiva de los cationes en equilibrio crean una doble capa eléctrica alrededor de la partícula de arcilla (figura 8) (Hinrich, 1983; Rattan, 2004).

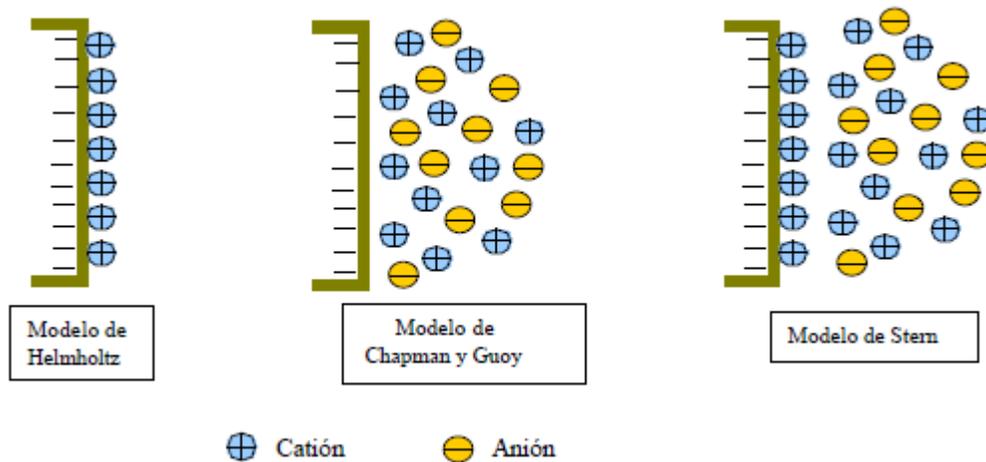


**Figura 7.** Carga negativa de las partículas de arcilla: a. seca: b. completamente hidratado. (Fuente: Rattan, 2004)



**Figura 8.** Doble capa eléctrica. (Fuente: Rattan, 2004)

Para un sistema arcilla – agua salada (sólido y solución electrolítica) son posibles diferentes modelos que representan a la teoría de la doble capa eléctrica en las arcillas; estos son los modelos de Helmholtz, Gouy y Stern.



**Figura 9.** Modelos esquemáticos que representan la teoría de la doble capa eléctrica según: Helmholtz, Chapman-Gouy y Stern. (Fuente: Jaramillo, 2012)

**Tabla 6.** Comparación de modelos que representan la teoría de la doble capa eléctrica. (Fuente: Ferreira, 2006; Gómez, 2015)

<b>Modelo</b>	<b>Descripción</b>
Helmholtz, 1879	Una capa de cargas en una superficie sólida y una capa rígida de iones de carga opuesta.
Chapman y Guoy, 1910-1913	Una capa de cargas en una superficie sólida y una capa difusa de iones con distribución estadística en la solución.
Stern, 1924	Una capa de cargas en una superficie sólida y una capa de contraiones constituida por una subcapa de contraiones absorbida en forma rígida y una subcapa difusa de iones en solución.

El modelo de Helmholtz considera que la distribución de las cargas se hace en dos capas eléctricas paralelas y rígidas (Gómez, 2015); es decir, Es un modelo muy simple y fue la primera descripción de la doble capa de cargas. Helmholtz declaró que la doble capa actuaría como un condensador, donde se distribuye la carga negativa sobre toda la superficie, y los cargos se alinean paralelos a la superficie a una distancia  $x$  determinada (Ferreira, 2006).

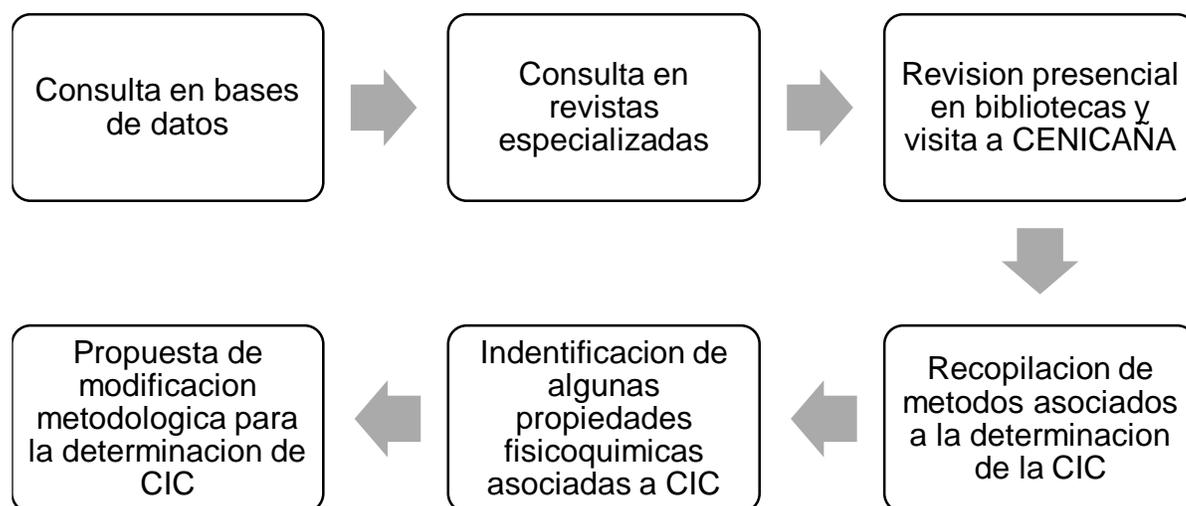
El modelo de Chapman y Guoy considera que hay una capa eléctrica negativa y rígida en la superficie de los coloides, la cual está equilibrada por una capa difusa de iones (Gómez, 2015), este modelo propone una distribución no uniforme de cargas puntuales sobre la superficie que influyen en la doble capa sólo a través de su constante dieléctrica que se supone invariante con la posición en la capa doble. Además, se supone que los iones y la superficie están implicados sólo en las interacciones electrostáticas (Yaron, 1996).

El modelo de Stern propone que la doble capa difusa consta de dos partes que están separadas entre sí por un plano que define una capa interna rígida, como la de Helmholtz y una capa externa difusa de iones, como la Chapman y Guoy (Gómez, 2015). Por lo tanto, el modelo de capa doble de Stern, asume que los iones tienen energía de interacción específica y son de un tamaño finito. Por lo tanto, los iones llegan a la superficie de una manera limitada y se encuentra en algunos nanómetros de la superficie de la partícula (Ferreira, 2006).

## 4 MATERIALES Y METODOS

### 4.1 Metodología empleada

Para el cumplimiento de cada uno de los objetivos propuestos en la presente monografía, se realizó en una revisión bibliográfica en las principales bases de datos relacionadas con el estudio del suelo como lo son: AGRIS, EBSCO, SCIELO, SCIENCE DIRECT. Artículos extraídos del portal de revistas de la Universidad Nacional de Colombia, revista digital de la Universidad Nacional Autónoma de México, Biblioteca Digital de la Universidad ICESI, Biblioteca digital de la Universidad de la Salle, Revista Suelos Ecuatoriales, Biblioteca Mario Carvajal de la Universidad del Valle, Revistas Científicas de la Fundación Universitaria Juan de Castellanos, Revista de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño y publicaciones de los principales centros de investigación asociados al cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca (Asocaña, Cenicaña y Tecnicaña) como se presenta en la tabla 3.1. De toda la información recopilada se extraerán los principales conceptos, características, propiedades y ventajas que tiene la capacidad de intercambio catiónico en los suelos, adicional se extraerán los métodos con mayor exactitud y precisión en la determinación de la capacidad de intercambio catiónico, CIC, en suelos al igual que los principales factores en los procesos de intercambio catiónico.



**Figura 10.** Metodología empleada en la revisión y elaboración de la monografía.

**Tabla 7.** Fuentes de consulta.

<b>Nombre fuente de consulta</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tema</b>
Ebsco	Base de datos	Multidisciplinar
Science Direct	Base de datos	Multidisciplinar
Agris	Base de datos	Ciencias Agrícolas
Scielo	Base de datos	Multidisciplinar
Biblioteca digital ICESI	Biblioteca	Multidisciplinar
Biblioteca Univalle	Biblioteca	Multidisciplinar
Biblioteca Digital La Salle	Biblioteca	Multidisciplinar
Biblioteca Cenicaña	Biblioteca	Caña de Azúcar
Portal de revistas UN	Revista	Multidisciplinar
Revista digital UNAM	Revista	Multidisciplinar
Revistas Ciencias Agrícolas	Revista	Ciencias Agrícolas
Suelos Ecuatoriales	Revista	Ciencias Agrícolas
Revistas Científicas FUJC	Revista	Multidisciplinar

## 5 RESULTADOS Y DISCUSION

Finalizada la revisión bibliográfica, se identificaron los siguientes artículos relacionados con la capacidad de intercambio catiónico, su evaluación y determinación bajo las condiciones edafoclimáticas de los suelos asociados a cultivos de caña de azúcar en el Valle del Cauca. Por último, se identificaron metodologías relacionados con la determinación de este parámetro en diferentes tipos de suelo que permitieron dar cumplimiento al objetivo de este estudio.

**Tabla 8.** Revisión Bibliográfica

Tema	Resultados importantes	Autor	Observaciones
Comportamiento de la CIC en algunos suelos ácidos de origen volcánico.	Los valores de CIC obtenidos por métodos convencionales dependieron del número de lavados, induciendo errores debido a retención de sales o hidrólisis.	Fuentes, 1971	Se utilizaron varios métodos convencionales incluyendo métodos que utilizan sales amortiguadas y otros con sales no amortiguadas
Comparación de la CIC determinada por cuatro métodos en suelos del altiplano de pasto	Para suelos volcánicos del altiplano de pasto el método del Acetato de amonio dio valores más altos en la determinación de la CIC	Chaves, 1973	Se recomienda hacer estudios más detallados, emplear otros métodos y estudiar algunas modificaciones de las técnicas.
Estudio comparativo de métodos para la determinación de CIC en suelos de la provincia de Santiago	Los resultados obtenidos por estos métodos se correlacionaron con los valores teóricos de CIC de cada muestra, estos mostraron una correlación altamente significativa con la suma de cationes intercambiables y con los métodos de acetato de sodio 1N a pH 7 y pH 8,2	Bernardi, 1973	La suma de cationes de intercambio, constituye una estimación de la CIC, siempre que se efectúen las correcciones pertinentes a los cationes solubles del extracto de saturación.

**Tabla 8.** Revisión bibliográfica (continuación)

Tema	Resultados importantes	Autor	Observaciones
Comparación de cinco métodos para determinar capacidad de intercambio catiónico en suelos alcalinos	Se encontró que el método de acetato de sodio 1N pH 8.2, evaluó la Capacidad de Intercambio Catiónico con mayor precisión y exactitud que los otros cuatro métodos propuestos.	Atuesta, 1974	Los otros cuatro métodos propuestos sobrestimaron la Capacidad de Intercambio Catiónico.
Comparación de dos métodos para la determinación de la CIC en suelos calizos	se obtienen mejores resultados por el método I que en el método II	Abadía, 1980	Ninguno de los dos procedimientos es aconsejable cuando se trabaje con suelos yesosos.
Ensayo sobre tipología de suelos colombianos - énfasis en génesis y aspectos ambientales	Se presentan las principales clases de suelos en las principales regiones de Colombia.	Malagón, 2003	Tipología de los suelos colombianos, en las diferentes regiones naturales de Colombia.
Capacidad de intercambio catiónico en arena y caolín usando acetato de amonio, acetato de sodio y cloruro de amonio	No pudo establecerse correspondencia entre la CIC determinada por el método del cloruro de amonio y la determinada por el acetato de sodio 1N pH 8,2 (total) y el acetato de amonio 1N pH 7 por suma de cationes.	Henríquez, 2005	Se sugiere la posibilidad del uso del cloruro de amonio como metodología de rutina para determinar la CIC en los suelos arcillosos.

**Tabla 8. Revisión Bibliográfica (continuación)**

<b>Tema</b>	<b>Resultados importantes</b>	<b>Autor</b>	<b>Observaciones</b>
Fundamentos para la búsqueda, evaluación y calibración de nuevas metodologías analíticas para suelos en el trópico.	La CIC de un suelo depende en forma crítica de la manera y condiciones en las cuales es determinada.	García, 2006	Por su rapidez, sencillez y economía el análisis de suelos ha sido una valiosa herramienta para el diagnóstico de la fertilidad del suelo y sus problemas.
Aumento de la Productividad de Caña de Azúcar por Unidad de Área Cultivada	La baja capacidad de los suelos en el Valle del río Cauca para producir más caña por hectárea como resultado de la pérdida de fertilidad, lo que demanda la adopción inmediata de tecnologías para garantizar la sostenibilidad de la agroindustria en el tiempo.	Luna, 2006	Se plantea la utilización de material orgánico y el manejo de los microorganismos como alternativas posibles para mejorar y mantener la fertilidad de los suelos.
Estudio de la CIC en la recuperación de un suelo afectado por incendios forestales en el municipio de Nemocon, Cundinamarca.	Se presentó una CIC alta no porque el suelo tuviera altas concentraciones de cationes o materia orgánica, sino debido a que su pH se encuentra entre extremadamente a muy fuertemente ácido y se presentan elementos tóxicos como el aluminio.	Vargas, 2007	Para mantener una CIC estable se debe contar un abastecimiento de materia orgánica permanente para que los coloides no disminuyan en el suelo y los nutrientes se encuentren disponibles continuamente.
Evaluación de la posible contaminación de suelos y agua subterránea con elementos pesados por el uso de vinazas en el cultivo de la caña de azúcar	La vinaza es un mejorador de suelos tanto físico como químico y puede ser utilizado como fertilizante natural en reemplazo de fertilizantes químicos sin contaminar los suelos y aguas subterráneas.	Girón, 2008	La legislación ambiental colombiana debe tener unas normas más claras con respecto a la contaminación de suelos.
Efectos de agroquímicos en las propiedades fisicoquímicas y biológicas en suelos del Táchira-Venezuela	Se estableció una metodología sencilla, reproducible poco contaminante y confiable para determinar contaminación por agroquímicos en suelos.	Ramírez, 2009	Fomentar la investigación para potenciar las prácticas de conservación de suelos para reducir al mínimo la degradación de estos.

**Tabla 8.** Revisión Bibliográfica (continuación)

Tema	Resultados importantes	Autor	Observaciones
Capacidad de extracción de cationes mediante acetato de amonio, acetato de sodio y cloruro de amonio	Los mayores valores de la CIC fueron obtenidos con Acetato de amonio, lo cual concuerda con reportes de que este método incrementa la CIC. La más baja CIC fue obtenida con Acetato de Sodio debido al bajo poder de reemplazo relativo del Na <sup>+</sup> contra el del ión amonio, lo cual es indicativo que no es el método más adecuado para la determinación de la CIC en estos suelos.	Rodríguez, 2011	Las evidencias encontradas en estos resultados sugieren que el método del Cloruro de Amonio, pudiera utilizarse para evaluar rutinariamente, la CIC real de los suelos. Para ello sería necesario realizar calibraciones para discriminar la capacidad de evaluar la fertilidad del suelo mediante el método del cloruro de amonio 0,2N.
Recommended Methods for Determining Soil Cation Exchange Capacity	Para una medida precisa de la CIC de un suelo, se sugiere el procedimiento de intercambio compulsivo de BaCl <sub>2</sub> . Este método da una estimación de la capacidad del suelo para retener cationes no ácidos en condiciones de campo.	Ross & Ketterings, 2011	La materia orgánica induce una CIC mayor a un pH casi neutro que en condiciones ácidas. Por lo tanto, la adición de un material orgánico probablemente aumentará la CIC de un suelo a lo largo del tiempo.
Evaluation of Cation Exchange Capacity (CEC) in Tropical Soils Using Four Different Analytical Methods	Se ensayaron cuatro métodos analíticos para la determinación de CIC en suelos tropicales, con el fin de definir cuál es el más adecuado en función de los requisitos: tiempo de análisis, grado de fiabilidad y costo de operación.	Aprile & Lorandi, 2012	La CIC es un indicador importante de las propiedades del suelo. Sin embargo, existen varias propiedades intrínsecas del suelo que pueden interferir con la concentración de iones y por lo tanto los valores de CIC, dando una falsa interpretación de los resultados.

<p>Evaluación del comportamiento de las propiedades fisicoquímicas y biológicas de un suelo sódico del Guacanal - Cerrito (Valle del Cauca) tratado con un inoculante biológico.</p>	<p>La dosis alta de inoculante biológico contribuyó al mejoramiento de la CIC del suelo analizado, esta propiedad se asocia al contenido de materia orgánica y el contenido de arcilla.</p>	<p>Méndez, 2012</p>	<p>Otro aspecto que aporta a la CIC es la textura del suelo, pues al ser una arcilla, el contenido de CIC se hace alto.</p>
<p>Estudio del comportamiento del Pb, Cd, Cu y Zn después de la aplicación de compost en un suelo typic haplustolls cultivado con caña de azúcar</p>	<p>A mayor dosificación de compost existe mayor riesgo de incrementar las concentraciones totales Pb y Cu en el suelo. Con respecto al Cd y Zn, no se evidenció incremento en sus concentraciones totales</p>	<p>Vargas, 2012</p>	<p>Se recomienda un mayor control sobre la aplicación de compost con el objetivo de prevenir posibles impactos ambientales producto de la acumulación de metales pesados en el suelo, ocasionada por la aplicación del compost en los cultivos de caña de azúcar.</p>

**Tabla 8. Revisión Bibliográfica (continuación)**

Tema	Resultados importantes	Autor	Observaciones
Evaluación de los efectos en las propiedades hidrodinámicas de un suelo inceptisol y en el desarrollo de un cultivo de caña de azúcar ( <i>Saccharum officinarum</i> L.) por la aplicación de biosólidos provenientes de la PTAR cañaveralejo de Cali	La capacidad de intercambio catiónico, el contenido de materia orgánica y nutrientes como P y K, mostraron valores medios y altos, proporcionando buenas condiciones de fertilidad al suelo utilizado.	Peña, 2012	El uso de los biosólidos provenientes de la PTAR de Cañaveralejo es viable para la aplicación agrícola (fertilización) en este tipo de terrenos, por lo menos durante un ciclo vegetativo del cultivo de caña de azúcar.
Efecto de la aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas e hidrodinámicas de un suelo cultivado con caña de azúcar ( <i>Saccharum officinarum</i> L.)	El pH de este suelo es considerado como alcalino, alta capacidad de intercambio catiónico efectiva, contenidos medios a altos de N, P, K y alto contenido de bases intercambiables pero con desbalance en las relaciones Ca:Mg y Mg:K.	Peñarete, 2012	Finalmente la aplicación de biosólidos como fuente de materia orgánica y de nutrientes es importante para mejorar las condiciones del suelo; No obstante, las dosis empleadas en la investigación no tuvieron un efecto contrastante.
Evaluación de las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar ( <i>Saccharum officinarum</i> L.) bajo la aplicación de biosólidos.	Se determinó que la CIC del suelo es alta, puede considerarse como fértil, aunque por la gran abundancia de iones alcalinos (Ca, Mg, K, Na), puede presentar al mismo tiempo desequilibrio iónico en el perfil del suelo y conllevar a que se presente antagonismo entre nutrientes limitando su absorción por parte del cultivo.	Meléndez, 2012	Continuar evaluando el efecto de la aplicación de los biosólidos sobre las propiedades físicas en diferentes suelos cultivado con caña de azúcar,

**Tabla 8. Revisión Bibliográfica (continuación)**

Tema	Resultados importantes	Autor	Observaciones
Determinación de la composición de la fase soluble del suelo y su impacto en la producción de caña de azúcar ( <i>Saccharum Officinarum</i> ), Valle de Santa Ranas, Honduras, C.A	El pH y el contenido de arcilla en un suelo, tienen una marcada influencia en la producción de azúcar en relación a la disponibilidad de iones solubles.	Barrios, 2012	Mantener el pH superior a 5.5 para asegurar efectividad en la absorción de iones solubles y aplicar fertilizantes ricos en nitratos, sulfatos y fosfatos.
Evaluación de la eficiencia del maní forrajero ( <i>Arachis pinto</i> ) en el mejoramiento de la calidad de suelos, en condiciones de competencia en un arreglo agroforestal sin manejo agronómico	La evaluación de la eficiencia del <i>Arachis pinto</i> arroja como resultado que el uso de esta leguminosa contribuye en el mejoramiento de la calidad del suelo.	Gómez, 2015	Se propone continuidad al proceso de investigación con <i>Arachis pinto</i> aplicando labores agronómicas mínimas, para verificar la efectividad de la leguminosa como mejoradora del suelo
Comparación de dos métodos de determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos de la región central de Honduras	Al comparar los dos métodos de estimación de CIC, el método por acetato de amonio a pH 7 tuvo valores en más altos que en el método por sumatoria de bases medidas por absorción atómica.	Chávez, 2015	Realizar un estudio donde se considere el tipo de arcilla y la fertilización previa al momento de determinar las variables.

De acuerdo con la revisión bibliográfica la capacidad de intercambio catiónico en suelos asociados al cultivo de caña en el departamento del Valle del Cauca, en especial los suelos de los municipios de Palmira, Candelaria y Cerrito son considerados los más fértiles. Ya que poseen las condiciones edafoclimáticas ideales para el cultivo de esta planta. Estos suelos se caracterizan por ser de textura franco-arcillosa, su pH oscila entre 5.5 y 7.0, poseen buena drenabilidad y son de topografía plana, poseen un alto contenido de materia orgánica, la relación de Ca/Mg intercambiable adecuada y los contenidos de estos nutrimentos son altos por lo tanto su capacidad de intercambio catiónico (CIC) es alta. Lo anterior hace que

estos suelos se sitúan dentro de las mejores regiones cañeras del mundo (Meléndez, 2012).

El departamento del Valle del Cauca, es considerado uno de los más productivos por contar con suelos de alta fertilidad, pero se ubica en zonas de alta evaporación y baja precipitación, presentando condiciones propicias para la formación de suelos básicos (Méndez, 2012). (Ver tabla 9).

**Tabla 9.** Escalas de suelos del Valle del Cauca.

<b>Clases de suelos</b>	<b>Características</b>
Suelos Clase I	Son suelos de calidad óptima y pueden cultivarse sin mayores dificultades, se trata de terrenos planos no inundables ni fácilmente erosionables.
Suelos Clase II y III	Al igual que la clase I son llanos, con leve propensión a la erosión y no inundables.
Suelos Clase IV	Utilizados para cultivos temporales o limitados, pueden ser tanto más escarpados que la clase III, están más desgastados y pueden ser susceptibles a la erosión y tener menos fertilidad.
Suelos Clase V	No son apropiados para los cultivos, pero sí lo son para las praderas y bosques. Estos suelos son demasiados húmedos o pedregados como para ser cultivados, pero si pueden ofrecer forraje o productos forestales.
Suelos Clase VI	Son tierras apropiadas para la vegetación permanente y su uso debe estar limitado a pastoreo o a explotaciones forestales con restricciones moderadas. Por tener un declive marcado, estos suelos están expuestos a erosión, lluvias y vientos.
Suelos Clase VII	No son apropiados para cultivos, se trata de suelos escarpados, fácilmente erosionables, y aunque pueden ser recomendados mejor para bosques.
Suelos Clase VIII	Sus tierras son francamente inapropiadas para cultivar, pastos, bosques, pues se trata de zonas áridas o de pantanos de imposible desecación. Así, son lugares aptos únicamente para especies faunísticas silvestres.

Fuente: Cortes Ortiz, B. (2010).

Los suelos en el valle geográfico del río Cauca fueron agrupados en ocho clases agrológicas que se caracterizan por los atributos de la tierra de acuerdo al clima, pendiente, características físico-químicas, erosividad, drenaje y peligros de inundación. La distribución espacial de la zona plana según la clasificación agrológica de suelos presenta el 67,5% de las clases I, II y III que corresponden a los suelos más fértiles. Con gran representatividad dentro de los municipios de Palmira, Candelaria y Cerrito, estas regiones tienen las principales áreas más sembradas de caña de azúcar del departamento, los cuales tienen tres características básicas: mayor área sembrada de caña de azúcar, suelos fértiles con respecto a los otros municipios del departamento (Cortes, 2010).

De acuerdo a la Tabla 4.2, los suelos de clase I son adecuados para un margen amplio de plantas y cultivos, los cuales corresponden al 11% del territorio en zona plana y que puede considerarse como tierras “excepcionalmente fértiles”, las cuales no tendrán problemas ambientales (a corto y mediano plazo), soportando el monocultivo de la caña de azúcar. El 18,9% y el 26,5% corresponden a suelos de clase II y clase III respectivamente, son tierras que tienen algunas limitaciones para los cultivos intensivos tecnificados o monocultivos, requieren prácticas y obras especiales de conservación algo costosas de aplicar (Cortes, 2010).

### **5.1 Relación de algunas propiedades fisicoquímicas con el comportamiento de la Capacidad de Intercambio Catiónico**

La fertilidad de los suelos se refiere a su habilidad para soportar el crecimiento de las plantas. Ella es producto de la estructura física la cual determina la aireación, capacidad de retención de agua y penetración de las raíces y de su fertilidad química, es decir, de la habilidad para suministrar nutrientes en forma aprovechable para las plantas (Meléndez, 2012). Por lo tanto, La CIC, es una propiedad química del suelo estrechamente vinculada a su fertilidad, depende de los coloides inorgánicos (arcillas cristalinas, geles amorfos, óxidos y sesquióxidos de hierro y aluminio) y del contenido de Materia Orgánica (MO). La mayoría de los suelos tienen una carga permanente y otra carga que varía con el pH observándose un aumento de la CIC con el pH, por lo que la CIC total se mide a pH 8,2 (Méndez, 2012).

El valor que toma la CIC de un suelo también está fuertemente afectado por el valor del pH al cual se hace la determinación, aumentando el valor de la CIC al aumentar el pH. Lo anterior es muy importante tenerlo en cuenta ya que en los suelos donde se cultiva con éxito la caña de azúcar, el pH oscila entre 5.5 a 7.8 unidades para su óptimo desarrollo. Suelos con valores de pH inferiores a 5.5 unidades pueden limitar la producción por la presencia de niveles altos de aluminio intercambiable y micronutrientes como hierro y manganeso que pueden producir fitotoxicidad a la planta. En suelos con valores de pH mayores a 8 se presentan niveles altos de sodio intercambiable que pueden causar toxicidad a las plantas e inducir cambios en las condiciones físicas del suelo, reduciendo la porosidad y resultando en drenajes muy

pobres con una conductividad hidráulica muy lenta (Meléndez, 2012; Méndez, 2012).

El otro aspecto que aporta a la CIC es la textura del suelo, pues al ser una arcilla, el contenido de CIC se hace alto. La textura más equilibrada para el buen desempeño agrícola en el cultivo de caña de azúcar, corresponde a la de suelos francos (arcillas de 7-27%; limo 28-50%); éstos presentan una tendencia uniforme a retener agua a la vez que permiten la difusión de gases, con lo cual las funciones fisiológicas de la planta no sufrirán limitaciones (Peñarete, 2012).

La capacidad de intercambio catiónico de cualquier suelo es determinante para un adecuado desarrollo de cualquier planta, por lo tanto, su correcta determinación reviste especial relevancia. Entre los métodos comúnmente utilizados para la medición de la capacidad de intercambio de catiónico (CIC), están los que emplean el acetato de amonio 1N; consiste en la saturación de la superficie de intercambio con un catión índice, el ion amonio; lavado del exceso de saturante con alcohol; desplazamiento del catión índice con potasio y determinación del amonio mediante destilación. El amonio se emplea como catión índice debido a su fácil determinación, poca presencia en los suelos y porque no precipita al entrar en contacto con el suelo. La concentración normal que se usa asegura una completa saturación de la superficie de intercambio, y como está amortiguada a pH 7.0, se logra mantener un cierto valor de pH. El lavado con alcohol pretende desplazar el exceso de saturante y minimizar la pérdida del amonio adsorbido (Fernández, 2006).

Como se mencionó anteriormente, hay una fuerte dependencia de la CIC del pH del suelo y, por lo tanto, en el ámbito del laboratorio, del pH de la solución con la cual se hace la saturación inicial del suelo. Para obviar este problema se han estandarizado varios métodos para determinar la CIC del suelo, tratando de tener alternativas para la amplia variedad de suelos que se pueden encontrar (Jaramillo, 2012). Los métodos más utilizados generalmente emplean como catión índice el  $\text{NH}_4^+$ , el  $\text{K}^+$ , el  $\text{Na}^+$  o el  $\text{Ba}^{2+}$  en soluciones generalmente tamponadas.

Los métodos rutinarios utilizados en la determinación de la CIC son: a) cloruro de bario trietanolamina a pH 8,2 ( $\text{BaCl}_2\text{-TEA}$ ); b) acetato de amonio 1N a pH 7; c) acetato de sodio a pH 8,2; y d) por sumatoria de las bases en el extracto del acetato de amonio 1M extraídas al pH en que el suelo se encuentra en el campo, más la acidez intercambiable, extraída con  $\text{KCl}$  1N, determinación denominada CIC efectiva (CICE) (Rodríguez, 2011).

Fundamentalmente se han establecido tres condiciones para hacer la determinación de la CIC del suelo, dependiendo de su pH:

- A pH 8.2, útil para suelos alcalinos.

- A pH 7, para suelos que presentan una reacción entre ligeramente ácida y ligeramente alcalina, muy adecuada para suelos con carga permanente.
- Al pH del suelo para aquellos suelos que son ácidos y cuya carga es predominantemente variable.

Recordemos que la caña de azúcar crece bien en diferentes tipos de suelos, pero el pH óptimo para su desarrollo es de 6.5 (ligeramente ácido), aunque tolera suelos ácidos hasta alcalinos. Con un pH próximo o menor de 4.5, la acidez del suelo limita la producción, principalmente por la presencia de aluminio intercambiable y de algunos micronutrientes como hierro y manganeso que pueden ocasionar toxicidad y muerte de la planta (Quintero, 1995).

En la determinación de la CIC del suelo, con cualquiera de los métodos disponibles, se siguen fundamentalmente tres etapas en todos los métodos:

- Etapa de saturación del suelo con soluciones salinas de un determinado catión.
- Etapa de lavado del exceso de la solución saturadora.
- Etapa de determinación del catión indicador extraído del suelo.

## **5.2 Métodos para la determinación de CIC existentes**

Actualmente no hay un método universal para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico, sin embargo, la técnica más difundida para la determinación de la CIC de los suelos, ha sido la de saturar el complejo de intercambio con acetato de amonio 1N a pH 7 tanto para suelos ácidos como alcalinos. Alternativamente existen varios procedimientos de laboratorio que han sido objeto de numerosas investigaciones en relación con la eficiencia de cada uno de ellos para evaluar la capacidad de intercambio catiónico en diferentes tipos de suelo. Al mismo tiempo estas investigaciones evalúan el efecto que ejerce la materia orgánica, el pH y la naturaleza coloidal sobre la capacidad de intercambio catiónico en suelos.

El pH al cual se realice la medición de la CIC puede tener un efecto en la adsorción de iones en la muestra de suelo. Los métodos utilizados para determinar la CIC se pueden agrupar en dos categorías principales, de acuerdo con el pH utilizado (Pansu, 2003; Martínez, 2011).

**Tabla 10.** Métodos utilizados en la determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico.

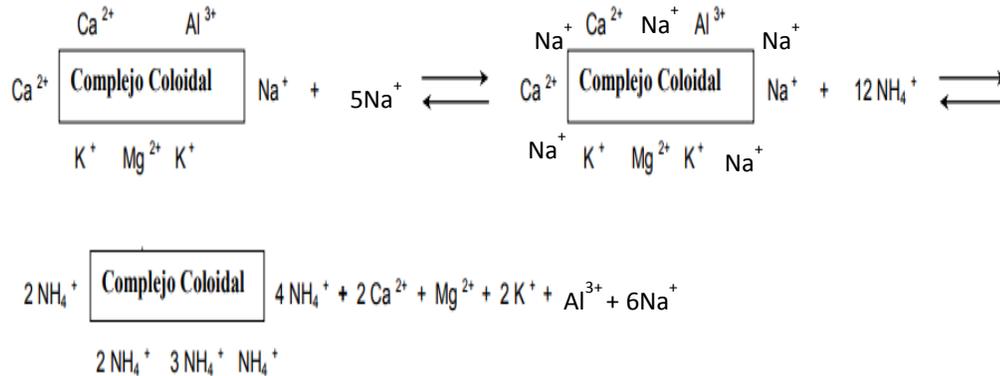
<b>Medición de la CIC al pH del suelo (medio no amortiguado)</b>	<b>Medición de la CIC a un pH diferente del pH del suelo (medio amortiguado)</b>
Método de cloruro de bario y sulfato de magnesio	Método de acetato de sodio a pH 8.2
Método de Cloruro de Hexamincobaltato	Método de acetato de amonio a pH 7.0
Método de Azul de Metileno (MBT)	Método de CIC al pH del suelo
	Método de cloruro de bario amortiguado con trietanolamina a pH 8.1
	Método colorimétrico con acetato de cobre
	Método de intercambio compulsivo con BaCl <sub>2</sub>

### **5.2.1 Medición de la CIC a un pH diferente del pH del suelo (medio amortiguado)**

En un medio amortiguado (en presencia de un buffer) la determinación de las cargas del complejo de intercambio a pH constante se utiliza con los cationes monovalentes o divalentes a diferente pH. Las soluciones amortiguadas se utilizan para eliminar la influencia de las variaciones del pH inicial del medio sobre la medición de la CIC y para expresar todos los resultados sobre la misma base, es decir al pH elegido. Los métodos amortiguados están normalizados, se utilizan soluciones con un pH entre 4.0 y 9.0; los valores de pH más frecuentemente utilizados son 7.0 (correspondiente a la neutralidad), 8.1 y 8.2 (Pansu, 2003).

### 5.2.1.1 Determinación de la CIC a pH 8.2

El método de acetato de sodio es un método en presencia de un buffer a pH 8.2 que utiliza Na<sup>+</sup> como catión índice.



**Figura 11.** Mecanismo de intercambio catiónico para la determinación de CIC a pH 8,2. Fuente: (Autor, 2017; Vásquez, 2014)

Con la determinación a pH 8.2 se evalúa la CIC total del suelo (Sánchez, 1981). Hay varias alternativas analíticas para llevar a cabo esta evaluación, entre las que pueden destacarse el método del acetato de sodio (García, 1989; Motta, 1990) y el método por suma de cationes (Soil Survey Laboratory, SSL) (Soil Survey Laboratory, 1996).

De los métodos enunciados en el párrafo anterior, el método de la suma de cationes consiste en sumar la cantidad de bases extraídas del suelo mediante lavado con acetato de amonio (NH<sub>4</sub>OAc) 1N a pH 7, con la acidez extraída con cloruro de bario-trietanolamina (BaCl<sub>2</sub>-TEA) tamponada a pH 8.2. El contenido de bases totales (BT) se calcula con la siguiente ecuación:

$$BT = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ \quad (1)$$

Para establecer la acidez extractable (AE), se calcula con la siguiente ecuación:

$$AE = \frac{(V-V_1)}{\text{peso muestra}} \times N \times 100 \quad (2)$$

Dónde: V: mL HCl gastados en la titulación del blanco.  
V<sub>1</sub>: mL de HCl gastados en la titulación de la muestra.  
N: normalidad del HCl.

Una vez calculado el contenido de bases totales (BT) y la acidez extractable (AE), se procede a calcular la CIC a pH 8.2, mediante la ecuación:

$$CIC\ 8.2 = BT + AE \quad (3)$$

Para suelos alcalinos se ha recomendado el método del acetato de sodio a pH 8.2, el cual fue evaluado en suelos salinos y sódicos de Valle del Cauca, encontrándose que fue el mejor de los métodos evaluados para determinar la CIC en este tipo de suelos (Gómez, 1994). La CIC del suelo se calcula con la siguiente ecuación:

$$CIC\ 8.2 = \frac{LC * 250}{\text{peso muestra} \times 10 \times 23} \quad (4)$$

Donde:

LC: lectura de Na en el equipo de absorción atómica en mg L<sup>-1</sup>

Alternativamente, la norma técnica colombiana NTC 5268 propone el método de saturación con acetato de sodio 1N y pH 8,2 para todo tipo de suelo, especialmente suelos calcáreos, suelos con presencia de gibsita (hidróxido de aluminio) y salinos. En este método los cationes intercambiables se reemplazan por el ión sodio, el cual se cuantifica posteriormente con el equipo de absorción atómica o absorción atómica en emisión, previa calibración con una curva con patrones de Na (ICONTEC, 2014). La CIC se calcula de la siguiente manera:

$$CIC = \frac{(\text{meq/l de Na} * 250 * (100 + Pw))}{(1000 * M_{\text{muestra}})} \quad (5)$$

Donde:

M<sub>muestra</sub>: peso en gramos de la muestra seca

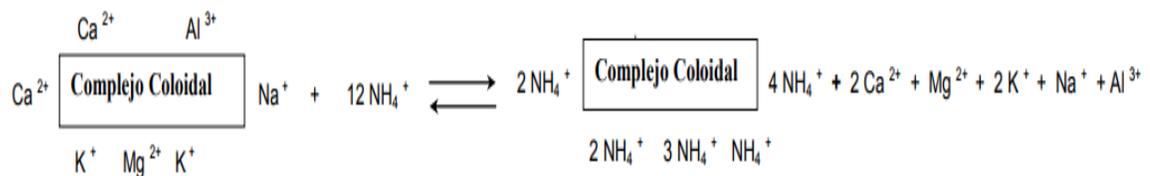
Pw: humedad de la muestra a 105<sup>o</sup> C, expresada sobre base seca

El método de acetato de sodio es un método en presencia de un buffer a pH 8.2 que utiliza Na<sup>+</sup> como catión índice. Este método es adecuado para las muestras que contienen carbonatos, yeso y también se puede usar en suelos sálicos y sódicos. En el Valle del Cauca, los centros de investigación y los ingenios azucareros utilizan el método de saturación con acetato de sodio 1N a pH 8.2, posterior extracción de sodio con acetato de amonio 1N a pH 7 y cuantificación de sodio por absorción

atómica, como el método más adecuado para evaluar la capacidad de intercambio catiónico en suelos cultivados con caña de azúcar (CENICAÑA, 2017).

### 5.2.1.2 Determinación de la CIC a pH 7

La determinación de la capacidad de intercambio catiónico con acetato de amonio 1N, regulado a pH 7.0, es ampliamente el método más utilizado a nivel mundial, fue propuesto por Watson en 1956 y desde entonces ha sufrido muchas adaptaciones. En este, la muestra es saturada con el catión índice  $\text{NH}_4^+$  en un medio con un buffer a pH 7.0. El  $\text{NH}_4^+$  se adsorbe y ayuda a que una cantidad equivalente de cationes intercambiables se mueva de la superficie arcillosa. El exceso de contraiones se elimina con algún disolvente (Martínez, 2011). Una ventaja de utilizar este método es que el extractante es altamente regulado por lo que la extracción se realiza a un pH constante y conocido, pH 7.0; además el ion  $\text{NH}_4^+$  en el complejo de intercambio se determina fácilmente (Ciesielski, 1997; ICONTEC, 2014).



**Figura 12.** Mecanismo de intercambio catiónico para la determinación de CIC a pH 7.  
Fuente: (Vásquez, 2014)

Para esta evaluación hay también varias alternativas analíticas propuestas por el laboratorio de Levantamiento de Suelos del USDA (Soil Survey Laboratory, 1996) aunque el método del  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1N y neutro es el más utilizado y, por esta razón, se calcula la CIC del suelo con la ecuación:

$$\text{CIC } 7.0 = \frac{((mlm - mlb) * N * 100)}{(\text{peso muestra})} \quad (6)$$

Dónde:

- mLm: mL de NaOH gastados en la titulación del extracto de la muestra.
- mLb: mL de NaOH gastados en la titulación del blanco.
- N: normalidad del NaOH.

Adicional, la norma técnica colombiana NTC 5268 propone el método saturación con acetato de amonio 1 N Y pH 7 Para todo tipo de suelo, excepto suelos calcáreos, suelos con presencia de gibsita (hidróxido de aluminio) y salinos. En este método

los cationes intercambiables se reemplazan por el ión amonio, por medio del cual se cuantifica la CIC posteriormente (ICONTEC, 2014). La CIC se calcula de la siguiente manera:

$$CIC = \frac{V_{NaOH} * N_{NaOH} * (100 + Pw)}{Mmuestra} \quad (7)$$

Donde:

$V_{NaOH}$ : volumen en mililitros de NaOH

$N_{NaOH}$ : Normalidad del NaOH

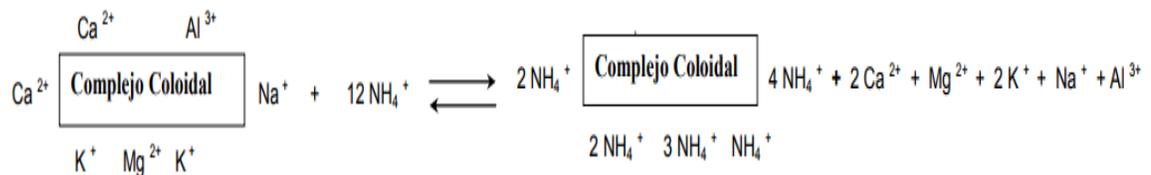
$Mmuestra$ : peso en gramos de la muestra seca

$Pw$ : humedad de la muestra a 105°C, expresada sobre base seca.

En comparación con los dos primeros métodos, el acetato de amonio pH 7, presenta varias dificultades debido a que el  $NH_4^+$ , puede formar complejos de superficie de esfera interna con las arcillas 2:1, lo cual ocasiona imprecisión en los resultados. En segundo lugar, incrementa la carga variable de los suelos ácidos y por tanto aumenta su CIC. Por otro lado, en los suelos con presencia de carbonatos, disuelve estos con lo cual, se sobrestiman los valores de las bases cambiables (Rodríguez, 2002).

### 5.2.1.3 Determinación de la CIC al pH del suelo

Es llamada CIC permanente del suelo (Sánchez, 1981) y CIC real o efectiva (CICE) (Galiano, 1991). Se puede medir desarrollando el método del  $NH_4OAc$  1N, pero ajustando el pH de la solución al valor del pH del suelo. El procedimiento anterior implica una gran limitación para su uso, pues impone la necesidad de preparar una gran cantidad de soluciones con diversos valores de pH, situación que no es práctica sobre todo si se piensa en la gran cantidad de análisis que puede llevar a cabo un laboratorio comercial.



**Figura 13.** Mecanismo de intercambio catiónico para la determinación de CIC a pH del suelo. Fuente: (Vásquez, 2014)

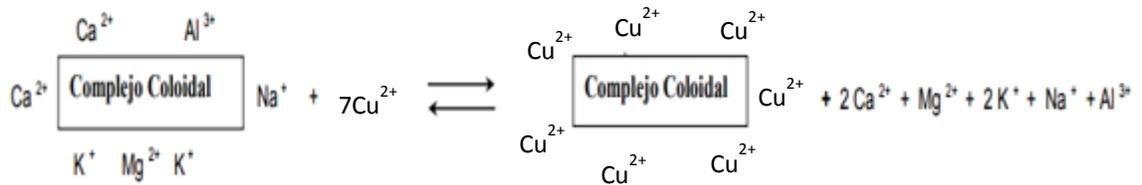
Debido a dicho inconveniente, la capacidad de intercambio catiónico se hace igual a la suma de las bases extraídas con  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1N a pH 7 (BT), más la acidez intercambiable (AI) extraída con KCl 1N. La siguiente ecuación recoge lo dicho antes:

$$CICE = BT + AI = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+) + (\text{Al}^{3+} + \text{H}^+) \quad (8)$$

Éste es el método más recomendable para determinar la CIC en suelos que tengan carga variable.

#### 5.2.1.4 Determinación de la CIC por colorimetría

La determinación de la CIC de un suelo también puede ser determinada por colorimetría (Jaramillo, 2012) con este método se cuantifica la capacidad que tiene el suelo de intercambiar cationes, con base en el cambio de color que sufre una solución de cobre al pasar a través del suelo, cambio que está directamente relacionado con la cantidad de cobre que fue retenido por el suelo:



**Figura 14.** Mecanismo de intercambio catiónico por colorimetría. Fuente: (Autor, 2017; Vásquez, 2014)

$$CIC = \frac{\text{Conc. final} \cdot \text{vol}}{\text{peso muestra}} \quad (9)$$

Donde:

Conc. Final: Concentración de cobre en el filtrado, después del desplazamiento con sodio.

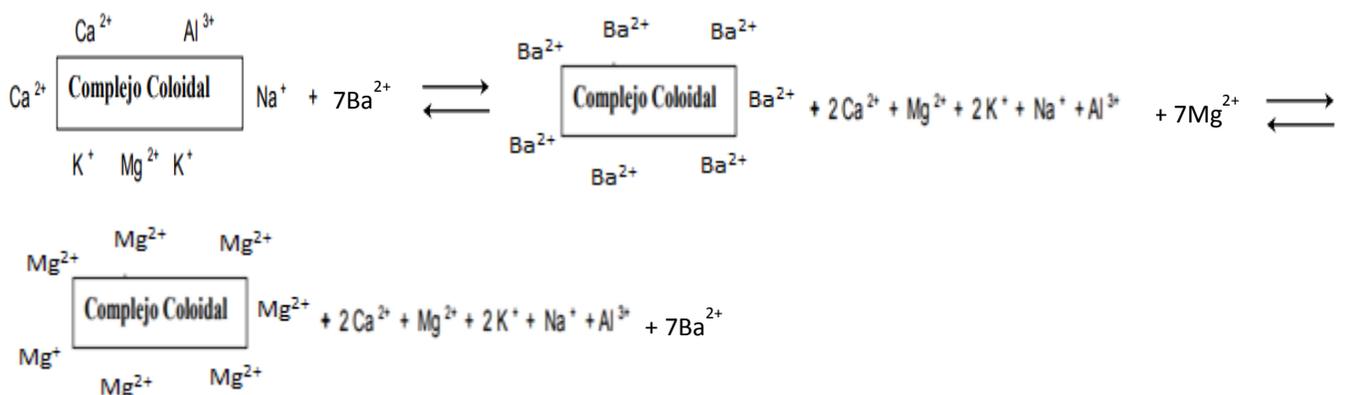
Vol: Volumen de solución de NaCl adicionado a la muestra.

También es posible estimar la CIC del suelo sin reemplazar el cobre por sodio: después de adicionar la solución de acetato de cobre se hace la filtración y se recoge el filtrado y en éste se hace la lectura en el colorímetro; se lleva el valor leído a la curva de calibración y se establece la concentración de cobre que tiene; el valor de concentración obtenido para el filtrado se le resta al valor de la concentración de la solución inicial de cobre y la diferencia obtenida es la cantidad de cobre que fue retenida por el suelo.

Para calcular la CIC del suelo se utiliza la misma fórmula, pero tomando como concentración final la obtenida por diferencia entre la inicial y la del filtrado y como volumen de referencia el volumen de solución de acetato de cobre adicionado a la muestra para llevar a cabo el reemplazamiento de los cationes intercambiables del suelo por el  $\text{Cu}^{2+}$ . Esta variante del método anterior puede ser una alternativa adecuada para utilizarla en suelos que tengan altos contenidos de materia orgánica o de aluminosilicatos no cristalinos, ya que ellos presentan adsorción selectiva de  $\text{Cu}^{2+}$ , haciendo muy difícil su reemplazo por el  $\text{Na}^+$  (Jaramillo, 2012).

### 5.2.1.5 Determinación de la CIC por el método de $\text{BaCl}_2$ en presencia de un buffer de trietanolamina a pH 8.1

Los cationes monovalentes como el  $\text{Na}^+$  o el  $\text{Li}^+$  (enlazados a aniones como acetato, formiato o cloruro), o cationes divalentes como el  $\text{Ba}^{2+}$ , el  $\text{Ca}^{2+}$  o el  $\text{Mg}^{2+}$  (enlazados con cloruros, nitratos o sulfatos), se han utilizado en combinación con la trietanolamina (TEA) para amortiguar el medio (Pansu, 2003). En el método de cloruro de bario – trietanolamina, la muestra es saturada por el catión índice  $\text{Ba}^{2+}$  en presencia de un buffer de TEA a pH 8.1; después, el catión índice  $\text{Ba}^{2+}$  es desplazado por el catión  $\text{Mg}^{2+}$ . La titulación del  $\text{Mg}^{2+}$  permite la determinación de la CIC.



**Figura 15.** Mecanismo de intercambio catiónico por el método de  $\text{BaCl}_2$ . Fuente: (Autor, 2017; Vásquez, 2014)

$$CIC = 25 \times \frac{T_{Ba}}{w} \times Df \quad (10)$$

$T_{Ba}$  : Volumen de bario titulado de la solución

$w$  : peso de la muestra, g,

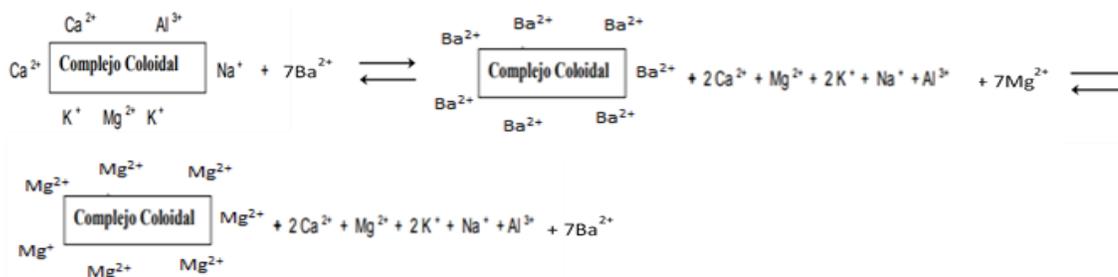
$Df$  : factor de dilución, es decir la relación del volumen final al volumen de la alícuota

### 5.2.1.6 Determinación de la CIC por el método de intercambio compulsivo con $BaCl_2$

Para una medida exacta de la Capacidad de Intercambio de un suelo en condiciones de campo, se sugiere el procedimiento de intercambio compulsivo con  $BaCl_2$  de Gillman y Sumpter (Gillman, 1986). Este método da una estimación de la capacidad del suelo para retener cationes no ácidos (CICb) en condiciones de campo.

El método de intercambio compulsivo de Gillman y Sumpter es el método Recomendado por la Soil Science Society of America (Sumner, 1996) porque es una medida altamente repetible, precisa y directa del CICb de un suelo. Este método determina CICb al pH y a la fuerza iónica del suelo. Para una estimación de la CICe, se debe agregar Al intercambiable obtenido por extracción con KCl 1 M. Sin embargo, para suelos con un pH de 6 o mayor el Al intercambiable será insignificante y la estimación CICb del método de intercambio compulsivo puede equipararse a CICe. La cuantificación de  $Mg^{2+}$  se realiza por AA cuya variación es proporcional a la CIC. Los resultados de la CIC se expresan en meq/100 g.

La desventaja es que este método lleva mucho tiempo y genera un residuo peligroso ( $BaCl_2 \cdot 2H_2O$ ). Este método es poco probable que sea adecuado para la mayoría de los laboratorios rutinarios de análisis de suelos y sólo podría ser ofrecido por los laboratorios de las universidades (Ross, 2011).



**Figura 16.** Mecanismo de intercambio por el método de intercambio compulsivo. Fuente: (Autor, 2017; Vásquez, 2014)

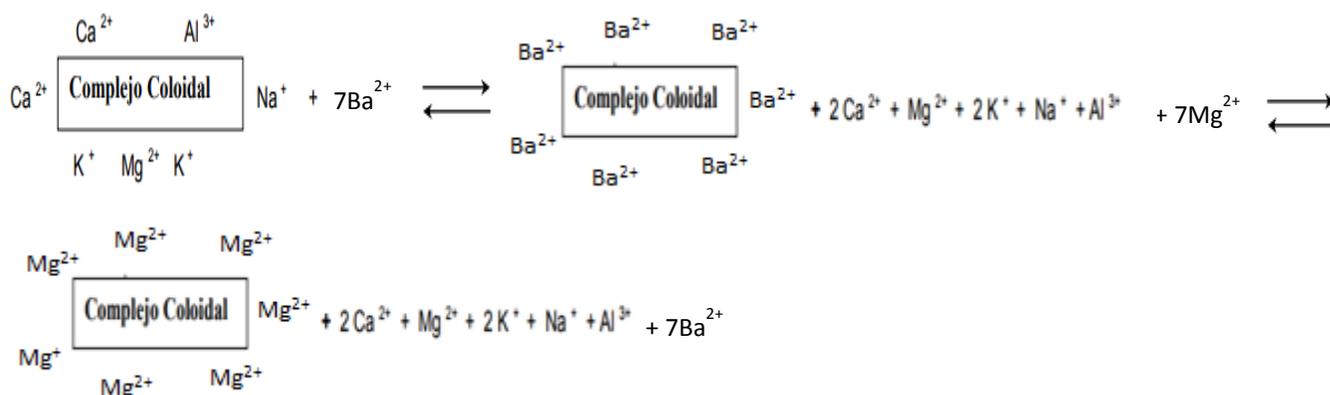
## 5.2.2 Medición de la CIC al pH del suelo (medio no amortiguado)

El intercambio catiónico se lleva a cabo a un pH cercano al pH de la muestra de suelo. En este medio el suelo es saturado con un contraión (ión índice), el exceso de este contraión se elimina con una solución diluida de el mismo; después el primer contraión es movido por un segundo contraión. La titulación del catión desplazado o la suma de los cationes de intercambio permiten determinar el valor de la CIC. Para cuantificar los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  se pueden emplear sales metálicas como el cloruro de bario, sulfato de magnesio o cloruro de potasio; cationes organometálicos como el Cloruro de Hexaminocobaltato, o cationes orgánicos como el azul de metileno (Pansu, 2003).

Los métodos de Cloruro de Bario – Sulfato de Magnesio, de Cloruro de Hexaminocobaltato y el de Azul de Metileno, todos sin presencia de buffer, que se describen a continuación, son métodos que han sido elegidos como de los más sencillos, efectivos y eficaces para determinar la CIC en suelos. (Martínez, 2011).

### 5.2.2.1 Determinación de la CIC por el método de $\text{BaCl}_2$ y $\text{MgSO}_4$

El método de  $\text{BaCl}_2$  y  $\text{MgSO}_4$  es un método de medición de la CIC sin presencia de un buffer. Este método consiste en mezclar la muestra arcillosa con una solución de  $\text{BaCl}_2$  0.1 M para que los contraiones de las arcillas en los sitios de intercambio sean desplazados por los cationes de  $\text{Ba}^{2+}$  y extraídos con la solución; después el residuo de la muestra es titulado con una solución de  $\text{MgSO}_4$  0.02 M para que los iones  $\text{Mg}^{2+}$  reemplacen a los iones de  $\text{Ba}^{2+}$  intercambiados; para detectar el punto final de la reacción, se emplea un conductímetro.



**Figura 17.** Mecanismo de intercambio catiónico por el método de  $\text{BaCl}_2$  y  $\text{MgSO}_4$ . Fuente: (Autor, 2017; Vásquez, 2014)

$$CIC = V_{MgSO_4} \times N_{MgSO_4} \quad (11)$$

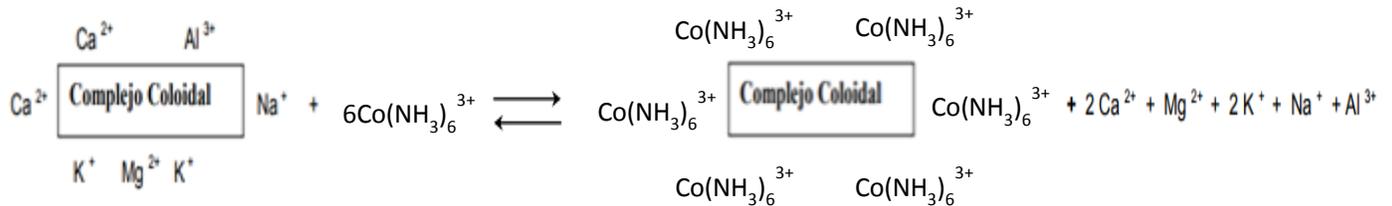
Donde:

$V_{MgSO_4}$  : volumen de  $MgSO_4$ , mL

$N_{MgSO_4}$ : normalidad de la solución de  $MgSO_4$ , meq/mL

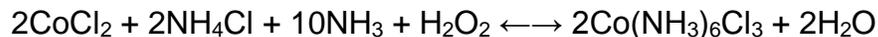
### 5.2.2.2 Determinación de la CIC por el método de Cloruro de Hexamincobaltato

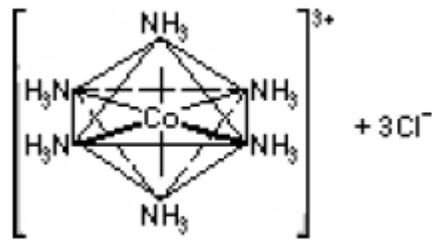
El método del Cloruro de Hexamincobaltato es un método de medición de la CIC sin presencia de un buffer. Este método consiste en saturar en exceso la muestra con cloruro de Hexamincobaltato (3-7 veces la CIC esperada) para que el catión Hexamincobaltato  $Co(NH_3)_6^{3+}$  se fije a los sitios de intercambio; entonces se mide con AAS (Espectrometría de Absorción Atómica) la concentración de cobalto, cuya variación es proporcional a la CIC (Pansu, 2003; Breeden, 2004). La CIC se calcula por la diferencia entre la cantidad añadida y remanente de  $Co^{3+}$  en la solución; el  $Co^{3+}$  adsorbido calculado corresponde a la CIC de la muestra.



**Figura 18.** Mecanismo de intercambio catiónico por el método de Cloruro de Hexamincobaltato. Fuente: (Autor, 2017; Vásquez, 2014)

El  $Co(NH_3)_6Cl_3$  es un catión organometálico, obtenido por la oxidación de una solución amoniacal de cloruro de cobalto que contiene cloruro de amonio en presencia de carbón activado como catalizador (Pansu, 2003), como se puede observar en la siguiente reacción:

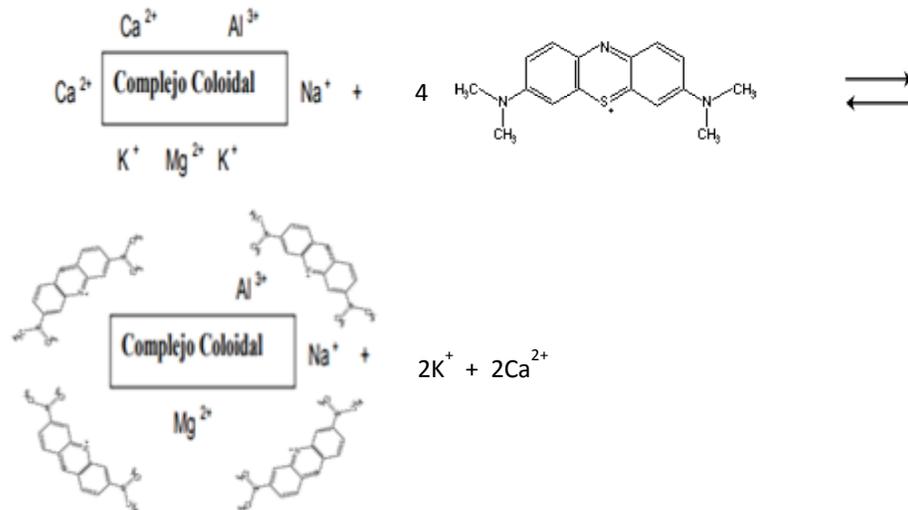




**Figura 19.** Molécula del Cloruro de Hexamincobaltato

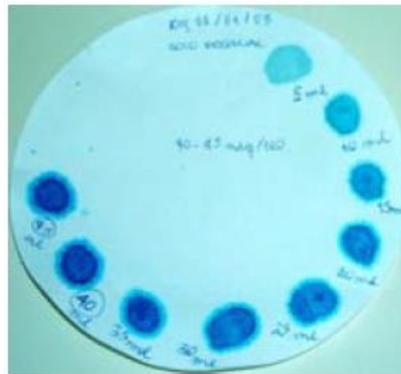
### 5.2.2.3 Determinación de la CIC por el método de azul de metileno

La prueba de azul de metileno (MBT) es un método sin presencia de un buffer, que ocupa cationes orgánicos; se utiliza con frecuencia para determinar la CIC de la arcilla (también su superficie específica) debido a su rapidez, sencillez y sus buenos niveles de reproducción. Este método consiste en la medición de la cantidad del catión azul de metileno que es adsorbido por las cargas negativas de una muestra arcillosa cuando ésta adsorbe al máximo una solución acuosa de cloruro de azul de metileno (Kitsopoulos, 1997; Pansu, 2003). El catión de azul de metileno durante el contacto con la solución acuosa y los materiales cargados negativamente adsorbe rápidamente moléculas por medio de un mecanismo de intercambio iónico irreversible. Debido al tamaño del catión la velocidad de adsorción decrece, mientras que el intercambio de posiciones ha sido ocupado (Pansu, 2003).



**Figura 20.** Mecanismo de intercambio catiónico por el método de azul de metileno. Fuente: (Autor, 2017; Vásquez, 2014)

Después de agregar el cloruro de azul de metileno a una suspensión arcillosa en incrementos regulares y constantes, se mezcla la suspensión durante algún tiempo para que el catión azul de metileno sea adsorbido sobre la superficie del mineral arcilloso, reemplazando los cationes en la capa difusa. Entonces, sobre un papel filtro se coloca una gota de la suspensión la cual se absorbe por capilaridad formando una marca circular. El ensayo termina cuando un halo de color azul claro se forma concéntricamente alrededor de la gota sobre el papel, este es el “punto final” que indica el exceso de azul de metileno en el fluido, es decir, la arcilla ya ha agotado sus cationes intercambiables y por lo tanto no puede seguir adsorbiendo más moléculas de azul de metileno. (Narsilio, 2008).



**Figura 21.** Determinación de la CIC por el método de azul de metileno

$$CIC = \frac{Ch \times Vm \times Cm}{Ws} \quad (12)$$

CIC: capacidad de intercambio catiónico, meq/100 g

Ch: constante volumétrica = 100,

Vm: volumen de la solución de azul de metileno,

Cm: concentración de azul de metileno, 0.01 meq/L,

Ws: peso de muestra.

La prueba del azul de metileno (MBT) es una técnica sencilla, económica y conveniente para el campo debido a sus resultados rápidos. Sin embargo, se sabe que el MBT no es muy fiable en comparación con los otros métodos dada su baja fiabilidad y reproducibilidad (Pansu, 2003).

La Interpretación de los resultados obtenidos en cada una de las determinaciones es posible, gracias a que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una propiedad química a partir de la cual es posible inferir acerca del tipo de arcilla presente, de la magnitud de la reserva nutrimental y del grado de intemperismo de

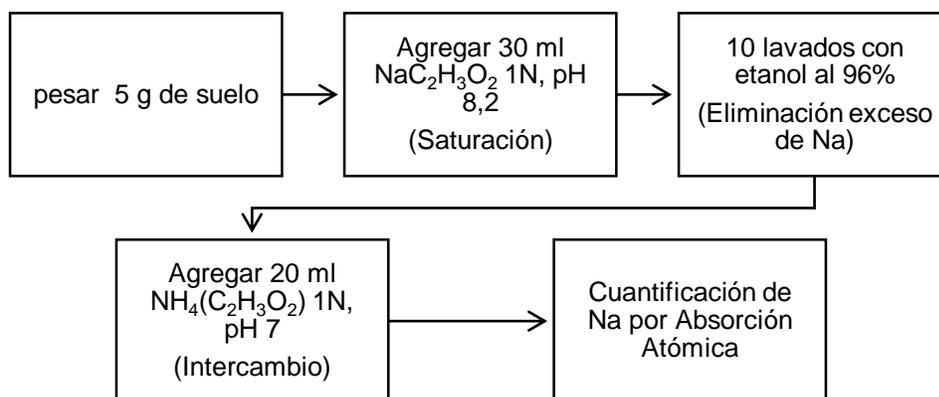
los suelos. El resultado numérico de la determinación sirve además como base en el cálculo del porcentaje de saturación de bases, que es un dato ampliamente usado en los estudios de fertilidad (Fernández, 2006).

### **5.3 Método propuesto para el análisis de la CIC en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar para la región del Valle del Cauca – Colombia**

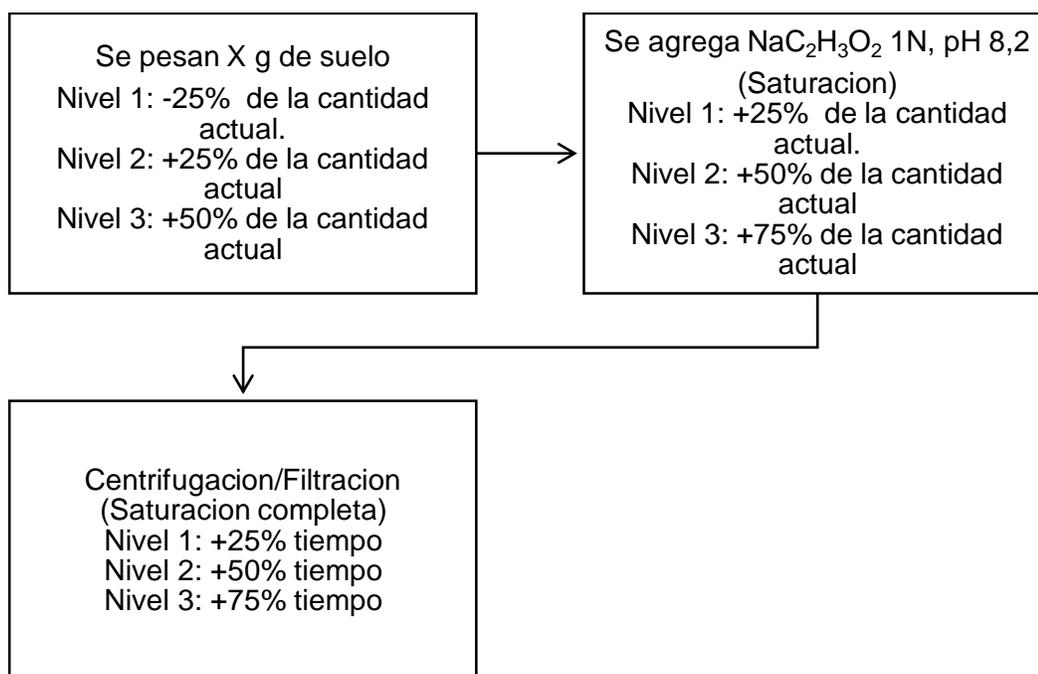
De acuerdo con el objetivo general de este trabajo el cual consiste en proponer una metodología teórica que permita determinar la capacidad de intercambio catiónico en suelos asociados al cultivo de caña en el departamento del Valle del Cauca teniendo en consideración las condiciones edafoclimáticas de los suelos de los municipios de Palmira, Candelaria y Cerrito considerados los más fértiles para el cultivo de esta planta.

El método comúnmente utilizado para la determinación de la CIC, ha sido la saturación del complejo de intercambio con acetato de amonio 1N a pH 7. Sin embargo, debido a la solubilidad del acetato de amonio con los carbonatos de calcio y magnesio, las sales solubles y la materia orgánica interfieren en el intercambio por lo tanto no es adecuado para determinar la CIC debido a que disminuye su valor; se prefiere el uso de otro catión índice como el  $\text{Na}^+$  o el  $\text{Ba}^{2+}$ , ya que estos se intercambian más completamente. El método de acetato de sodio es un método en presencia de un buffer a pH 8.2 que utiliza  $\text{Na}^+$  como catión índice por lo tanto es un método a tener en cuenta para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar.

En visitas realizadas en el centro de investigación de la caña de azúcar de Colombia (CENICAÑA), se identificó que gracias a las validaciones realizadas por este centro de investigación y de todos los laboratorios de suelos de los ingenios azucareros en el departamento se determinó que el método de saturación con acetato de sodio 1N a pH 8.2, posterior extracción de sodio con acetato de amonio 1N a pH 7 y cuantificación de sodio por absorción atómica, es el método más recomendable para determinar la CIC en este tipo de suelos en comparación con todos los métodos descritos en esta investigación.



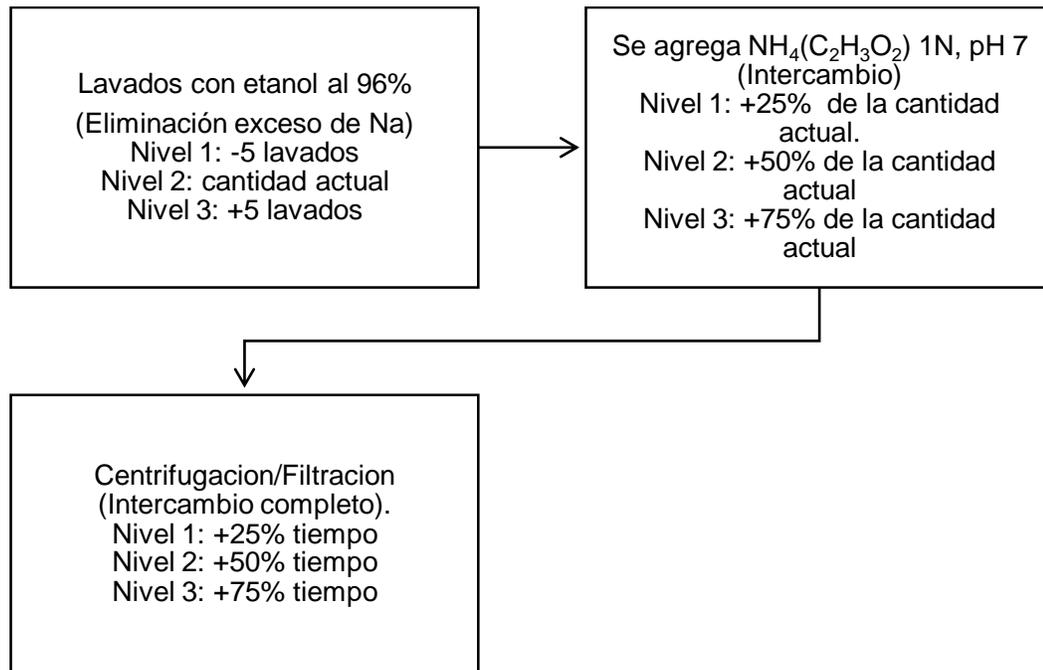
**Figura 22.** Metodología utilizada para la determinación de CIC en CENICAÑA



**Figura 23.** Metodología propuesta para la determinación de CIC en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca. Fase I (Saturación).

La metodología propuesta para la determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico en suelos dedicados al cultivo de caña, consiste en modificar la cantidad de muestra de suelo utilizada para el análisis, evaluando diferentes cantidades de la misma en menor o mayor proporción. En la etapa de saturación del complejo de cambio del suelo con acetato de sodio 1N a pH 8.2 se propone evaluar modificando el volumen de reactivo utilizado en menor o mayor cantidad para favorecer la saturación de la muestra con sodio y evaluar posibles reducciones de costos en el

uso del reactivo. Posteriormente, se incluiría una etapa de centrifugado para asegurar una completa saturación de la muestra con el acetato de sodio, adicionalmente esto permitirá acelerar el tiempo de análisis en esta etapa de la determinación ya que en la actualidad la muestra se debe dejar en contacto toda la noche con el acetato de sodio.



**Figura 24.** Metodología propuesta para la determinación de CIC en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca. Fase II (Intercambio).

Es importante evaluar el número de lavados con etanol al 96% con el fin de eliminar completamente el exceso de sales y de la solución de acetato de sodio no intercambiada (sodio soluble no intercambiable). El volumen de acetato de amonio 1N a pH 7 debe ser evaluado con el objetivo de asegurar que todo el sodio absorbido es intercambiado después de agregada esta solución. Previamente a esta etapa de intercambio, la muestra debe ser expuesta a una segunda etapa de centrifugado con el único fin de asegurar el intercambio total del sodio con el amonio.

Cuantificación de Na por Absorción Atómica y Emisión Atómica. Definir cual método de cuantificación se ajusta mejor a esta metodología con base en los resultados obtenidos.

**Figura 25.** Metodología propuesta para la determinación de CIC en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca. Fase III (Cuantificación).

Por último, la concentración de sodio extraída con acetato de amonio se propone cuantificarla tanto por el método de absorción atómica como por el método de emisión atómica con el fin de determinar cuál de los dos es más preciso al momento de determinar la CIC y así evitar subestimaciones de resultados que se presenten por el método de absorción atómica. Lo anterior es propuesta de evaluación debido a que elementos monovalentes como Li, K y Na son determinados preferiblemente por el método de emisión atómica.

La CIC se expresa como meq/100 g de suelo y se calcula de la siguiente manera:

$$CIC = \frac{LC \times 250 \times 100}{1000 \times W} \quad (13)$$

LC: lectura de Na en el equipo de absorción atómica o emisión atómica en meq L<sup>-1</sup>

W: peso de muestra en gramos

Esta metodología debe ser evaluada experimentalmente con el objetivo de determinar la mejor combinación de niveles en cada uno de los factores evaluados. Al igual que evaluar los tiempos de contacto con el fin de favorecer la saturación e intercambio catiónico completo y la cinética de la disolución de la matriz del suelo al contacto con las soluciones de intercambio. El ajuste correcto de estas variables puede brindar resultados más precisos en la determinación de la CIC en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar.

Los métodos vistos anteriormente son los más utilizados para la medición de la capacidad de intercambio de cationes (CIC), Los más destacados son los que emplean el acetato de amonio o de sodio, como extractante. Sin embargo, estos métodos presentan problemas asociados con las diversas propiedades químicas del suelo como son: dificultades para una adecuada evaluación de la CIC, debido a que incrementan la carga variable de los suelos ácidos de manera no predecible.

Por otro lado, ambos métodos disuelven los carbonatos presentes en los suelos incrementando la cantidad de cationes realmente cambiables y modifican el pH de la solución intermicelar, lo cual a su vez modifica la CIC al pH natural del suelo y por lo tanto, ambos métodos pueden generar resultados que no se ajusten a la realidad del suelo (Pérez, 2005). Actualmente, aun conociéndose las limitaciones que se presentan en la determinación de la CIC, los métodos que incluyen el acetato a pH tamponado, se siguen utilizando rutinariamente.

## 6 CONCLUSIONES

1. El método más difundido y conocido para la determinación del intercambio catiónico en suelos, es el que utiliza un medio amortiguado como lo es el acetato de amonio 1N a pH 7. Sin embargo, aun conociéndose las limitaciones que se presentan en la determinación de la CIC por este método, es utilizando rutinariamente en el análisis de suelos.
2. Los métodos de Cloruro de Bario – Sulfato de Magnesio, de Cloruro de Hexamincobaltato y el de Azul de Metileno, todos sin presencia de buffer, son métodos sencillos, efectivos y eficaces para la determinación de la CIC en suelos; sin embargo, su baja fiabilidad, poca reproducibilidad e interferencia con algunos iones ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) no son comparables con los métodos de acetato de amonio y acetato de sodio.
3. La determinación de CIC por el método colorimétrico puede ser utilizado en suelos que tengan altos contenidos de materia orgánica o de aluminosilicatos no cristalinos, ya que ellos presentan adsorción selectiva de  $\text{Cu}^{2+}$ , haciendo muy difícil su reemplazo por el  $\text{Na}^+$ . Sin embargo, en la presente revisión no se encontró aplicación de este método en suelos del Valle del Cauca asociados a cultivo de caña.
4. En el Valle del Cauca, el método más apropiado para la determinación de la CIC en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar es el método de acetato de sodio 1N a pH 8.2, ya que, de los cationes comunes, el sodio parece ser el más adecuado para determinar la CIC, este catión predomina en la mayoría de estos suelos por lo tanto este método se considera preciso para la evaluación de la capacidad de intercambio en suelos dedicados al cultivo de caña en el Valle del Cauca.
5. El método propuesto para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos asociados al cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca tiene alta probabilidad de arrojar resultados con mayor reproducibilidad y precisión en comparación con todos los métodos descritos en esta investigación, además este método es de fácil aplicación e implementación.

## 7 RECOMENDACIONES

1. El método propuesto para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos es netamente teórico producto de la revisión bibliográfica. Se recomienda extender la investigación y evaluar de forma experimental el método y ajustar el procedimiento desarrollado con el objetivo de optimizar el método propuesto para las condiciones típicas de Palmira, Candelaria y Cerrito en la región del Valle del Cauca – Colombia.
2. Es recomendable continuar con este tipo de estudios que permita establecer a los investigadores de forma rápida el estado del arte de los conceptos con el fin de optimizar los procesos de revisión y definición de objetivos en futuros trabajos de investigación aplicada.
3. Extender la búsqueda bibliográfica y consulta de nuevas bases de datos, dados los grandes avances que se pueden encontrar en otras fuentes y que podrían enriquecer la discusión de las monografías relacionadas con la CIC.

## 8 BIBLIOGRAFIA

Abadía, A. Eleizalde, M. Heras, L. Montañes, L. (1974). Comparación de dos métodos para determinar capacidad de intercambio catiónico en suelos calizos. Obtenido de: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/22037/1/ANALES15-1-2Abad%C3%ADaA..pdf>

Adams, M. (1995). Fundamentos de Química de Suelos. Caracas

Adams, J. M., & Evans, S. (1979). Determination of the cation-exchange capacity (layer charge) of small quantities of clay minerals by nephelometry. Obtenido de: <http://dx.doi.org/10.1346/CCMN.1979.0270210>

Adames, J. & Levy, L. (1960). Propiedades físicas de algunos suelos del Valle del Cauca. Obtenido de: [http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta\\_agronomica/article/view/48980](http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/48980)

Aprile, F. & Lorandi, R. (2012). Evaluation of Cation Exchange Capacity (CIC) in Tropical Soils Using Four Different Analytical Methods. Obtenido de: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/viewFile/13228/11406>

Atuesta Rengifo, C. (1974). Comparación de cinco métodos para determinar capacidad de intercambio catiónico en suelos alcalinos. Obtenido de [http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta\\_agronomica/article/viewFile/48448/49662](http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/viewFile/48448/49662)

Bache, B. W. (1976). The measurement of cation exchange capacity of soils. Obtenido de: <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2740270313>

Bascomb, C. L. (1964). Rapid method for the determination of the cation exchange capacity of calcareous and non-calcareous soils. Obtenido de: <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2740151201>

Blanco Sandoval, J.O. (2003). Manejo Integral de Suelos con Énfasis en el Cultivo del Arroz. Obtenido de: <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/jspui/bitstream/11348/4185/1/Manejo%20del%20suelos%20para%20arroz.pdf>

Barrios Botzoc, J. (2012). Determinación de la composición de la fase soluble del suelo y su impacto en la producción de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*), Valle de Santa Ranas, Honduras, C.A. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/1238/1/T3402.pdf>

Bergaya, F., & Vayer, M. (1997). CEC of clays; measurement by adsorption of a copper ethylenediamine complex. Obtenido de: [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-1317\(97\)00012-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-1317(97)00012-4)

Bernardi, C. & Tabilo, G. (1973). Estudio Comparativo de Métodos para la Determinación de Capacidad de Intercambio Catiónico en suelos de la Provincia de Santiago. Obtenido de: <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/agritec/NR14492.pdf>

Bohórquez, Alexander, Puentes, Yina J., & Menjivar, Juan Carlos. (2014). Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. Obtenido de: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0122-87062014000100007&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-87062014000100007&lng=en&tlng=es)

Breeden, D. y Shipman, J. (2004). Shale Analysis for Mud Engineers. American Association of Drilling Engineers, USA, Abril, pp. 1–17.

Buurman, P. (2011). Soil organic matter chemistry and changing concepts of soil genesis. *Suelos Ecuatoriales* 41 (2):93-97

Carreño, A. & Macías, J. (2007). Propuesta de un sistema de beneficio para una arcilla montmorillonítica nacional. Obtenido de: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1454/2/123943.pdf>

Carter, M. & Gregorich, E. (2007). Soil sampling and methods of analysis. Canadian society of soil science.

Casanova, E. (2005). Introducción a la ciencia del suelo. Caracas

Chávez, A. (2015). Comparación de dos métodos de determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos de la región central de Honduras. Obtenido de: <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/4564/1/CPA-2015-021.pdf>

Chaves, E & Pazos, F. (1973). Comparación de la capacidad de intercambio catiónico total determinada por cuatro métodos en suelos del altiplano de pasto. Obtenido de: <http://revistas.udenar.edu.co/index.php/rfacia/article/view/1380/1674>

Ciesielski, H & Sterckeman, T. (1997). A comparison between three methods for the determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils. Obtenido de: [http://www.agronomy-journal.org/articles/agro/abs/1997/01/Agronomie\\_0249-5627\\_1997\\_17\\_1\\_ART0002/Agronomie\\_0249-5627\\_1997\\_17\\_1\\_ART0002.html](http://www.agronomy-journal.org/articles/agro/abs/1997/01/Agronomie_0249-5627_1997_17_1_ART0002/Agronomie_0249-5627_1997_17_1_ART0002.html)

Cortes Ortiz, B. (2010). Descripción Socioambiental del Suelo en el Valle Geográfico del Río Cauca. El Caso de la Agroindustria Azucarera. Obtenido de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321727233005>

Cuero, R. (2012). Hacia un sistema complementario de producción más limpia en suelos degradados por salinidad. Ambiente y Sostenibilidad 2012 (2): 59-68.

Delgado Esguerra, M. (2012). Aplicación de las características fisicoquímicas del suelo como indicadores de la efectividad de las estrategias de restauración implementadas en el corredor barbas bremen (Quindío, Colombia). Obtenido de: [https://repository.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/bitstream/10906/68754/1/aplicacion\\_caracteristicas\\_fisicoquimicas.pdf](https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/68754/1/aplicacion_caracteristicas_fisicoquimicas.pdf)

Diez Lázaro, F. (2008). Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante

prácticas agronómicas. Obtenido de [https://minerva.usc.es/bitstream/10347/2540/1/9788498872026\\_content.pdf](https://minerva.usc.es/bitstream/10347/2540/1/9788498872026_content.pdf)

Dohrmann, R. (2006). Cation exchange capacity methodology III: Correct exchangeable calcium determination of calcareous clays using a new silver–thiourea method. Obtenido de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2006.02.010>

Dohrmann, R. (2006). Cation exchange capacity methodology I: An efficient model for the detection of incorrect cation exchange capacity and exchangeable cation results. Obtenido de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2005.12.006>

Domenech, X. & Peral, J. (2006). Química Ambiental de Sistemas Terrestres. Barcelona

Dorronsoro, C. (2016). <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema05/ccc.htm#anchor282513>: Lección 5, Propiedades Fisicoquímicas.

Fassbender, H. (1975). Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. Editorial IICA. Primera Edición.

Fassbender, H & Bornemisza, E. (1987). Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina. Obtenido de <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A9793e/A9793e.pdf>

Fernández Linares, L.C., Rojas Avelizapa, N.G., Roldán Carrillo, T.G., Ramírez Islas, M.E., Zegarra Martínez, H.G., Uribe Hernández, R., Reyes Ávila, R.J., Flores Hernández, D., Arce Ortega, J.M. (2006): Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Obtenido de: <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/509.pdf>

Ferreira Fontes, M & Ferracciú Alleoni, L. (2006). Electrochemical Attributes and Availability of Nutrients, Toxic Elements, and Heavy Metals in Tropical Soils. Obtenido de: <http://www.revistas.usp.br/sa/article/viewFile/22210/24234>

Francis, C. W., & Grigal, D. F. (1971). A rapid and simple procedure using  $^{85}\text{Sr}$  for determining cation exchange capacities of soils and clays. Obtenido de: <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-197107000-00004>

Fuentes, R. (1971). Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico en algunos suelos ácidos de origen volcánico. Obtenido de: <http://orton.catie.ac.cr/REPDOC/A3227E/A3227E.PDF>

Galiano, F. (1991). Capacidad de intercambio catiónico y aniónico, bases de cambio y saturaciones: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. SCCS. Bogotá. pp 164- 185.

García, A. (1989). Capacidad de intercambio catiónico. En: El análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Manual de asistencia técnica No. 47. ICA. Bogotá. pp 59-73.

García, A. (2006). Fundamentos para la búsqueda, evaluación y calibración de nuevas metodologías analíticas para suelos en el trópico. Obtenido de: <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/1.-Fundamentos-para-la-Busqueda.pdf>

García Molano, J. (2012). Sistemas Integrados de Producción Agropecuaria Sostenible. Obtenido de: <http://www.revistasjdc.com/main/index.php/conexagro/article/view/231>

Gillman, G. & Sumpster, E. (1986). Modification to the compulsive exchange method for measuring exchange characteristics of soils. Aust. J. Soil Res. 24:61-66.

Girón, M. (2008). Evaluación de la posible contaminación del suelo y agua subterránea con elementos pesados por el uso de vinazas en el cultivo de la caña de azúcar. Obtenido de: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_nlinks&ref=000169&pid=S0121-215X201500010000400035&lng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000169&pid=S0121-215X201500010000400035&lng=en)

Gómez, C. & García, A. (1994). Evaluación de métodos para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos salinos y/o sódicos del valle geográfico del río Cauca. Suelos Ecuatoriales 24: 55-59.

Gómez, D. (2015). Evaluación de la eficiencia del maní forrajero (*Arachis pintoi*) en el mejoramiento de la calidad de suelos, en condiciones de competencia en un arreglo agroforestal sin manejo agronómico. Obtenido de: <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/3443>

Gómez Forero, D. (2015). Evaluación de la eficiencia del maní forrajero (*Arachis pintoi*) en el mejoramiento de la calidad de suelos, en condiciones de competencia en un arreglo agroforestal sin manejo agronómico. Obtenido de: <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/3443>

Gómez, L & Parra, Y. (2015). Influencia de Fluidos en el Comportamiento de la Doble Capa Difusa en Arcillas. Obtenido de: <http://repository.ucatolica.edu.co/jspui/bitstream/10983/2373/1/Influencia-fluidos-en-comportamiento-doble-capa-difusa-en-arcillas.pdf>

Guerrero Prato, J. (1974). Influencia de la Materia Orgánica y Materiales Amorfos en la Capacidad de Intercambio Catiónico de Algunos Suelos de la Región Del Volcán Irazú. Editorial Bib. Orton IICA / CATIE. Pag 11-24.

Haluschak, P. (2006). Laboratory methods of soil analysis. Obtenido de: [http://www.manitoba.ca/agriculture/land/soil-survey/pubs/laboratory\\_methods\\_of\\_soil\\_analysis.pdf](http://www.manitoba.ca/agriculture/land/soil-survey/pubs/laboratory_methods_of_soil_analysis.pdf)

Hinrich, L. McNeal, B. McNeal, B. (1983). A Qualitative Derivation of the Diffuse Double Layer. Obtenido de: <https://www.crops.org/files//publications/nse/pdfs/jnr012/012-01-0026.pdf>

Howeler, R. (1986). Los suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical en Palmira, Colombia. Obtenido de: [http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Forrajes\\_Tropicales/pdf/4th/SuelosDelCiat.pdf](http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Forrajes_Tropicales/pdf/4th/SuelosDelCiat.pdf)

Informe Anual de Asocaña 2015-2016. Aspectos Generales del Sector Azucarero Colombiano 2015-2016. Obtenido de: <http://www.asocana.org/modules/documentos/11993.aspx>

ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2014). NTC 5268 Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico.

Jackson, M. L. (1962). Soil Chemical Analysis. New York: Prentice-Hall Inc. 498 pp.

Jaramillo, D. (2012). Introducción a la Ciencia del Suelo. Obtenido de: [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/2007223/lecciones/lect13/lect13\\_2.html](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/2007223/lecciones/lect13/lect13_2.html)

Kitsopoulos, K. P. (1997). Comparison of the Methylene Blue Absorption and the Ammonium Acetate Saturation Methods for Determination of CIC Values of Zeolite – Rich Tufts. Clay Minerals 32. pp. 319–322

León Sicard, T. (2004). Instituto de Estudios Ambientales - IDEA. Obtenido de [http://www.idea.unal.edu.co/publica/docs/Desde\\_la\\_Arcilla\\_y\\_el\\_Sudor.pdf](http://www.idea.unal.edu.co/publica/docs/Desde_la_Arcilla_y_el_Sudor.pdf)

Luna González, C. (2006). Aumento de la Productividad de Caña de Azúcar por Unidad de Área Cultivada, El biocarbón una alternativa ecológica y rentable. Obtenido de: [http://www.tecnicana.org/pdf/2006/tec\\_v10\\_no18\\_2006\\_p4-19.pdf](http://www.tecnicana.org/pdf/2006/tec_v10_no18_2006_p4-19.pdf)

Madero, E. Ramírez, J. Albán, A. Escobar, B. García, L & Peña, M. (2011). Compactación de suelos cultivados con caña de azúcar en la zona sur del Valle del Cauca. Obtenido de: <http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v60n3/v60n3a05.pdf>

Malagón, D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos - énfasis en génesis y aspectos ambientales. Obtenido de: <http://www.docentes.unal.edu.co/glvasque/docs/SUELOS%20DE%20COLOMBIA.pdf>

Malcolm, R. L., & Kennedy, V. C. (1969). Rate of cation exchange on clay minerals as determined by specific ion electrode techniques. Obtenido de: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1969.03615995003300020024x>

Martínez, A. (2011). Fundamentos de la Capacidad de Intercambio Catiónico. Obtenido de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3561/A6.pdf?sequence=6>

Martínez, A. (2011). Medición de la Capacidad de Intercambio Catiónico. Obtenido de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3561/A7.pdf?sequence=7>

Mckean, S. (1993). Manual de Análisis de Suelos y Tejido Vegetal. Obtenido de: [http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos\\_Ciat/Digital/S593.M2\\_Manual\\_de\\_an%C3%A1lisis\\_de\\_suelos\\_y\\_tejido\\_vegetal\\_Una\\_gu%C3%ADa\\_de\\_m%C3%A9todos\\_de\\_metodologia.pdf](http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/Digital/S593.M2_Manual_de_an%C3%A1lisis_de_suelos_y_tejido_vegetal_Una_gu%C3%ADa_de_m%C3%A9todos_de_metodologia.pdf)

Meier, L. P., & Kahr, G. (1999). Determination of the cation exchange capacity (CEC) of clay minerals using the complexes of copper (II) ion with triethylenetetramine and tetraethylenepentamine. Obtenido de: <http://dx.doi.org/10.1346/CCMN.1999.0470315>

Meléndez Oviedo, G. (2012). Evaluación de las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) bajo la aplicación de biosólidos. Obtenido de: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7820/1/CB-0461297.pdf>

Méndez, C. (2012). Evaluación del comportamiento de las propiedades físico-químicas y biológicas de un sódico del guacanal-cerrito (valle del cauca) tratado con un inoculante biológico. Obtenido de: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/9012/1/CB-0461066.pdf>

Méndez Yustres, C. (2012). Evaluación del Comportamiento de las Propiedades Físico-Químicas y Biológicas de un Suelo Sódico de El Guacanal-Cerrito (Valle Del Cauca) Tratado Con Un Inoculante Biológico. Obtenido de: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/9012/1/CB-0461066.pdf>

Mengel, D. Fundamentals of Soil Cation Exchange Capacity (CIC). Obtenido de: <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ay/ay-238.html>

Monsalvo, R. (1998). Adsorción de Electrolitos Monovalentes y Estabilidad de Lutitas. Tesis Profesional, Posgrado Facultad de Química, UNAM, México.

Motta, B. (1990). Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 5ª. Ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 502 p.

Narsilio, G. A. y Santamarina, J. C. Clasificación de suelos: Fundamento Físico, Practicas Actuales y Recomendaciones. Georgia Institute of Technology, USA.

Paco Abenza, D. (2011). Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta. Obtenido de: [http://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl\\_2072\\_202695/PFC\\_DanielPacoAbenza.pdf](http://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_202695/PFC_DanielPacoAbenza.pdf)

Pansu, M. y Gautheyrou, J. (2003). Handbook of Soil Analysis. Mineralogical, Organic and Inorganic Methods. Springer, USA.

Peña, J. (2012). Evaluación de los efectos en las propiedades hidrodinámicas de un suelo inceptisol y en el desarrollo de un cultivo de caña de azúcar (*saccharum officinarum* L.) por la aplicación de biosólidos provenientes de la ptar cañaveralejo de Cali. Obtenido de: <http://www.redalyc.org/pdf/2311/231125817006.pdf>

Peñarete Murcia, W. (2012). Efecto de la Aplicación de Biosólidos sobre las Propiedades Físicas e Hidrodinámicas de un Suelo Cultivado con Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*). Obtenido de: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/7646>

Pérez, J; Henríquez, M; Gascó, J; Rodríguez, O; (2005). Determinación de la capacidad de intercambio catiónico en arena y caolín usando acetato de amonio, acetato de sodio y cloruro de amonio. Obtenido de <http://oai.redalyc.org/articulo.oa?id=85717108>

Posso Agudelo, J. (2010). Evaluación de Diferentes Dosis de Compost y Lombricompost Aplicado al Suelo de Vivero de Palma Aceitera (*Elaeis guinensis*). Obtenido de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/2728/1/juliocesarpossoagudelo.2010.pdf>

Quintero Duran, R. (1995). Fertilización y Nutrición. Obtenido de [http://www.cenicana.org/pdf/documentos\\_no\\_seridados/libro\\_el\\_cultivo\\_cana/libro\\_p153-177.pdf](http://www.cenicana.org/pdf/documentos_no_seridados/libro_el_cultivo_cana/libro_p153-177.pdf)

Quiroga, A., Bono, A. (eds.) (2012): Manual de fertilidad y evaluación de suelos.- Ediciones INTA, EEA INTA Anguil Ing. Agr. Guillermo Covas.

Ramírez, T. (2009). Efectos de agroquímicos en las propiedades fisicoquímicas y biológicas en suelos del Táchira - Venezuela. Obtenido de: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7072/2/132279.pdf>

Ramírez Gavidia, T. (2009). Efectos de agroquímicos en las propiedades fisicoquímicas y biológicas en suelos de Táchira, Venezuela. Obtenido de: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7072/2/132279.pdf>

Rattan Lal, R. & Shukla, M. (2004). Principles of Soil Physics. CRC Press

Reeve, N. y M. E. Sumner. (1971). Cation exchange capacity and exchangeable aluminum in Natal Oxisols, Soil Soc. Am. Proc. 35: 38-42

Rhoades, J. (1982). Cation Exchange Capacity. In: Methods of Soil Analysis. Part. 2. Agronomy Monograph N° 9, (2nd. Edition). U.S. Salinity Lab. USDA- ARS, Riverside, C.A. 92501.

Rodríguez, M. (1983). Caracterización Suelos (Fertilidad). Editorial Bib. Orton IICA / CATIE.

Rodríguez, O, & Rodríguez, A. (2002). Comparación de la CIC en dos suelos, utilizando Acetato de Amonio, Acetato de Sodio y Cloruro de Amonio. Obtenido de:

[http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-78182002000400001&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182002000400001&lng=es&tlng=es)

Rodríguez, O; Sánchez, A; Mendoza, B; Rodríguez, Z; Henríquez, M; Rodríguez, V; Guerra, E. (2011). Capacidad de Extracción de Cationes Mediante Acetato de Amonio, Acetato de Sodio y Cloruro de Amonio. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33917977010>

Rojas, C. (2005). Recuperación de suelos afectados por sales en el departamento del valle del cauca mediante el uso de vinaza concentrada. Obtenido de: <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/1475011>. 4.2.5. Suelos. Plan Básico de Ordenamiento Territorial. (s.f.). Alcaldía Municipal de Nueva Segovia de San Esteban de Caloto. Obtenido de <http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/POT/caloto/07%20SUB.%20FISICO%20BIOTICO%20-%20SUELOS.pdf>

Ross, D & Ketterings, Q. (2011). Recommended Methods for Determining Soil Cation Exchange Capacity. Obtenido de: <http://s3.amazonaws.com/udextension/lawngarden/files/2012/10/CHAP9.pdf>

Salina, J. & García, R. (1985). Métodos químicos para el análisis de suelos ácidos y plantas forrajeras. CIAT

Sánchez, P. (1981). Suelos del trópico: Características y manejo. IICA. San José. Costa Rica. 534 p.

Santos, D.J.; Wilson, M.G., Ostinelli, M.M (2012): Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo. Protocolos básicos comunes. Obtenido de: <http://inta.gob.ar/documentos/metodologia-de-muestreo-de-suelo-y-ensayos-a-campo>

Silva, J. (2008). Reúso del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo PTAR-C en el riego de caña de azúcar. Tesis de maestría. Postgrado en ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle. Cali, Colombia. 166 Págs.

Soil Survey Laboratory (SSL). (1996). Soil survey laboratory methods manual. Soil survey investigations report N°. 42, version 3.0. United States Department of Agriculture (USDA). 693 p.

Sonon, L. Kissel, D & Saha, U. (2014). Cation Exchange Capacity and Base Saturation. UGA Extension. Obtenido de: [http://extension.uga.edu/publications/files/pdf/C%201040\\_1.PDF](http://extension.uga.edu/publications/files/pdf/C%201040_1.PDF)

Sumner, M. & Miller, W. (1996). Cation exchange capacity, and exchange coefficients. In: D.L. Sparks (ed.) Methods of soil analysis. Part 2: Chemical properties (3rd ed.). ASA, SSSA, CSSA, Madison, WI.

Valencia Islas, C.E. Química de Suelos o Química de Coloides. Obtenido de <http://agricolaunam.org.mx/edafologia/PAPIME%20APUNTES%20QUIMICA%20E%20SUELOS/Quimica%2008.pdf>

Vásquez, M. (2014). Capacidad de Intercambio Catiónico. Obtenido de: [http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/18681/mod\\_resource/content/1/TEMA%209%20-%20CAPACIDAD%20DE%20INTERCAMBIO.pdf](http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/18681/mod_resource/content/1/TEMA%209%20-%20CAPACIDAD%20DE%20INTERCAMBIO.pdf)

Vargas, J. (2007). Estudio de la capacidad de intercambio catiónico en la recuperación de un suelo afectado por incendios forestales en el municipio de Nemocon, Cundinamarca. Obtenido de: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/15609/T41.07%20V426e.pdf?sequence=1>

Vargas Vacca, A. (2012). Estudio del Comportamiento del Pb, Cd, Cu y Zn Después de la Aplicación de Compost en un Suelo Typic Haplustolls Cultivado con Caña de Azúcar. Obtenido de: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7577/1/Tesis%20A%20VARGAS%20Versi%C3%B3n%20final.pdf>

Vered, E & Rao, P. Requerimientos del Suelo. Obtenido de [http://www.sugarcane crops.com/s/soil\\_requirement/](http://www.sugarcane crops.com/s/soil_requirement/)

Yaron, B. Calvet, R. Prost, R. (1996). Soil Pollution: Processes and Dynamics. Springer Science & Business Media.