

## ***EL INTERCAMBIO IÓNICO***

---

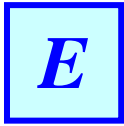
### ***CAPÍTULO 13***

#### ***CONTENIDO***

- ❖ Factores que controlan el intercambio iónico
  - Las propiedades del cambiador
  - Las propiedades del ión
  
- ❖ Capacidad de intercambio catiónico (CIC)
  - Determinación de la CIC del suelo
    - Determinación de la CIC a pH 8.2
    - Determinación de la CIC a pH 7
    - Determinación de la CIC al pH del suelo
    - Determinación de la CIC por colorimetría
  - Aplicaciones de la CIC del suelo
    - En la caracterización general de la carga del suelo
    - En la fertilidad de suelos
    - En la clasificación de suelos
  
- ❖ Capacidad de intercambio aniónico (CIA)
  
- ❖ Adsorción específica o selectiva
  
- ❖ La doble capa difusa

#### ***OBJETIVOS***

- ❖ Conocer el fenómeno del intercambio iónico en los suelos
  
- ❖ Conocer los métodos más utilizados para evaluar la CIC del suelo
  
- ❖ Aprender a manipular información relacionada con la CIC del suelo y con sus aplicaciones



El intercambio iónico es un proceso **reversible, estequiométrico y rápido** mediante el cual la fase sólida retira y retiene algunos iones de la solución del suelo, al tiempo que le entrega cantidades equivalentes de otros, para establecer un nuevo equilibrio entre las 2 fases.

Los procesos de intercambio mencionados se dan tanto con cationes como con aniones y la retención se lleva a cabo debido a la presencia de cargas electrostáticas en los coloides del suelo y en los iones presentes en la solución del mismo, los cuales se atraen hacia los sitios de carga contraria para neutralizarse. Este tipo de atracción electrostática se llama **adsorción**.

## 1. FACTORES QUE CONTROLAN EL INTERCAMBIO IÓNICO

La cantidad de iones que pueden adsorber los coloides del suelo depende de la cantidad de carga superficial que ellos tengan y la fuerza con que son retenidos depende de la densidad de carga del coloide (Zhang y Zhao, 1997). Recuérdese, además, del capítulo anterior cómo el pH controla la carga superficial generada por los coloides del suelo. Los procesos de intercambio iónico se ven afectados, tanto por las propiedades del cambiador, como por las del ion.

### 1.1. LAS PROPIEDADES DEL CAMBIADOR

El cambiador en el suelo corresponde a las partículas sólidas del mismo que tienen la posibilidad de intervenir en los procesos de intercambio, es decir, a los coloides minerales y orgánicos de aquel.

Las propiedades de los coloides que afectan el intercambio iónico en el suelo son, según Zhang y Zhao (1997):

- Cantidad y Tipo de aquellos presentes en el suelo, es decir, la cantidad (concepto textural) y tipo de arcilla (concepto mineralógico) y la cantidad y tipo de materia orgánica activa del mismo. Lo relacionado con estos tópicos se ampliará en numerales posteriores.
- Superficie específica que presenten los coloides.
- Densidad de carga de los coloides.

La superficie específica es función directa del tamaño de las partículas, lo que supone que los coloides deben presentar un alto valor en esta propiedad; el efecto que tiene el tamaño de las diferentes partículas del suelo en la superficie específica de ellas fue analizado en el Capítulo 6: la textura del suelo.

La densidad de carga, o sea la cantidad de carga que tiene una partícula por unidad de superficie que posea (Fassbender, 1982; Zhang y Zhao, 1997), se determina con la siguiente relación:

$$\text{Densidad de carga} = \frac{\text{Cantidad de carga}}{\text{Superficie específica}}$$

[13.1]

Las unidades en las cuales se expresa la densidad de carga son:  $\text{cmol m}^{-2}$  o  $\text{meq m}^{-2}$ . En la Tabla 13.1 se presentan los valores de cantidad de carga y de superficie específica que presentan algunos componentes coloidales comunes en el suelo, tomados de Fassbender (1982), de Bohn et al (1993) y de Zhang y Zhao (1997).

**TABLA 13.1.** Valores de cantidad de carga, superficie específica y densidad de carga (la más frecuente) de algunos coloides del suelo. (Tomados de Fassbender, 1982; Bohn et al, 1993 y Zhang y Zhao, 1997).

COLOIDE	CANTIDAD DE CARGA* [ $\text{cmol kg}^{-1}$ ]	SUPERFICIE ESPECÍFICA ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )	DENSIDAD DE CARGA ( $\text{cmol m}^{-2}$ ) $\times 10^{-7}$
Caolinita	9	7 a 30	1.286 a 0.3
Montmorillonita	100	766 a 810	0.131 a 0.124
Vermiculita	125	~ 750	0.167
Illita	30	67 a 100	0.448 a 0.3
Clorita	30	~ 100	0.3
Alofano	80	260 a 450	0.308 a 0.178

\* Puede tomarse como promedia y en los coloides mencionados la carga es negativa.

Zhang y Zhao (1997) diferencian dos tipos de superficies en las que se pueden ubicar las cargas de los coloides: una interna, que corresponde a la superficie de las caras de las láminas de los paquetes cristalinos de minerales de arcilla expansibles y otra externa, que corresponde a las superficies de los otros sólidos del suelo. La cantidad de superficie interna puede ser tan grande como  $700 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  de material, en la montmorillonita o  $400 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  en la halloysita hidratada. La superficie activa de los filosilicatos de tipo 1:1, de la illita y del alofano es toda externa.

## 1.2. LAS PROPIEDADES DEL IÓN

Ji y Li (1997) destacan que la fuerza de atracción entre una superficie cargada y un ión es directamente proporcional a la carga del ión e inversamente proporcional a la distancia al cuadrado que hay entre la superficie adsorbente y el centro del ión. Además, llaman la atención acerca del hecho de que los iones en el suelo se encuentran hidratados y que, por lo tanto, la cantidad de moléculas de agua que rodea el ión puede alterar el comportamiento de la fuerza de adsorción que ejerce la superficie cargada sobre el ión.

La energía de hidratación en un ión es directamente proporcional al cuadrado de la carga del ión e inversamente proporcional a su tamaño (Ji y Li, 1997). De lo expuesto anteriormente se puede decir entonces que las propiedades de los iones que más intervienen en los procesos de intercambio son:

- La carga del ión: Aquellos iones con carga mayor son retenidos con mayor firmeza por los cambiadores del suelo, cuando tienen igual tamaño.
- El tamaño del radio hidratado del ión: Al aumentar la cantidad de moléculas de agua que rodean el ión disminuye la fuerza de la retención que ejerce sobre él el coloide.
- El tamaño del radio cristalográfico del ión: Hay una relación inversa entre este tamaño y el tamaño del ión hidratado por lo cual, a mayor tamaño del ión deshidratado, mayor es la fuerza con la cual es retenido el ión, puesto que hay menor cantidad de moléculas de agua interpuestas entre el cambiador y el ión; el radio cristalográfico de algunos iones comunes en el suelo se presenta en la Tabla 13.2.

- Adicionalmente, la concentración del ión: Debido a la ley de acción de masas, aquel ión que se encuentre en mayor cantidad, será el que se retendrá preferencialmente en el suelo, en ausencia de adsorción selectiva.

**TABLA 13.2.** Radio cristalográfico y radio hidratado de algunos iones comunes en el suelo (Tomados de Bohn et al, 1993 y de Ji y Li, 1997).

IÓN	RADIO CRISTALOGRAFÍCO (nm)	RADIO HIDRATADO (nm)
Na <sup>+</sup>	0.097	0.358
K <sup>+</sup>	0.133	0.331
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.143	-
Mg <sup>2+</sup>	0.072	0.428
Fe <sup>2+</sup>	0.076	-
Ca <sup>2+</sup>	0.099	0.412
Al <sup>3+</sup>	0.054	0.475
Fe <sup>3+</sup>	0.064	-
Si <sup>4+</sup>	0.042	-
O <sup>2-</sup>	0.132	-
F <sup>-</sup>	0.136	0.352
Cl <sup>-</sup>	0.181	0.332
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.264	0.335
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.290	0.379

## 2. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC)

Es la medida de la capacidad que posee un suelo de adsorber cationes y es equivalente a la carga negativa del suelo. Esta propiedad es la que define la cantidad de sitios disponibles para almacenar los cationes en el suelo. 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. Además, como la retención se hace superficialmente obedeciendo a deferencias de carga electrostática, los cationes adsorbidos pueden ser intercambiados por otros de la solución del suelo, convirtiéndose en **cationes intercambiables**, necesarios en los procesos de nutrición de la planta.

Los cationes más importantes en los procesos de intercambio catiónico, por las cantidades de ellos que participan en dichos procesos, son Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup> (las **bases del suelo**) y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>; en suelos ácidos, a partir de ciertos valores de pH, como se verá más adelante, el Al<sup>3+</sup> juega un papel muy importante en el complejo de intercambio catiónico del suelo constituyendo, junto con el H<sup>+</sup>, la **acidez intercambiable** del mismo.

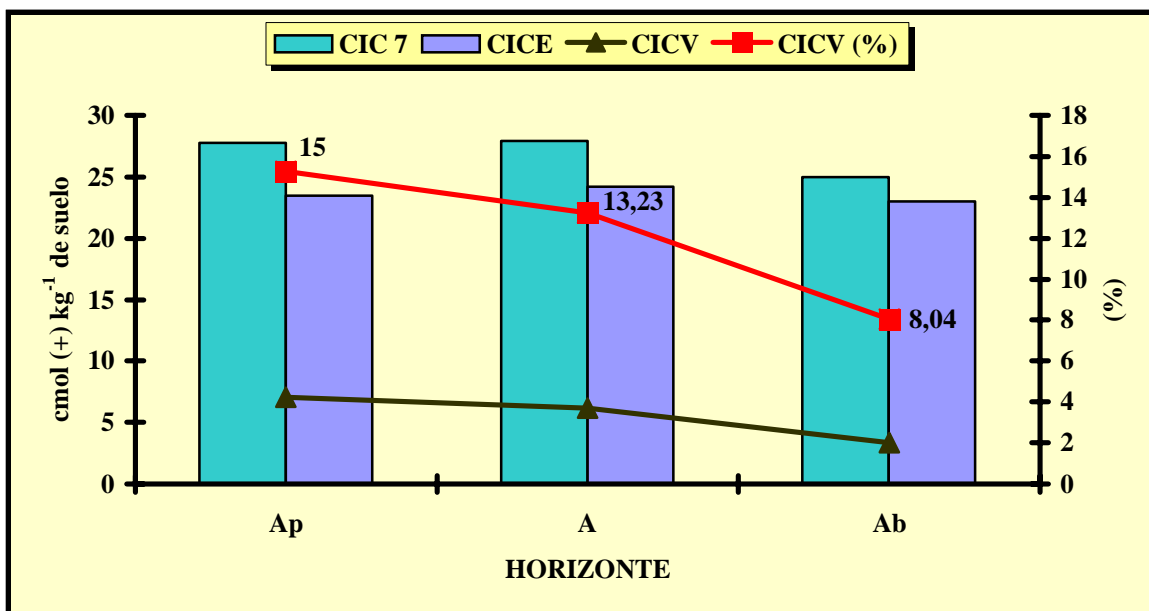
La CIC del suelo se expresa en **cmol (+) kg<sup>-1</sup> de suelo** o en **meq (100 g de suelo)<sup>-1</sup>** (ambas unidades son numéricamente iguales) y depende de la cantidad y tipo de coloides que tiene: **CIC del suelo = CIC de la arcilla + CIC de la materia orgánica**; como puede verse en la Tabla 13.3, la CIC de los diferentes coloides del suelo es muy variable. El efecto mencionado se observa al comparar las Figuras 13.1 y 13.2, las cuales representan la cantidad y tipos de CIC evaluadas en dos suelos: un Mollisol (Fluventic Haplustoll) y un Andisol (Typic Placudand), respectivamente; el Mollisol es de clima cálido seco (Santafé de Antioquia), con alto contenido

de esmectitas y bajo contenido de materia orgánica, en tanto que el Andisol es de clima frío húmedo (Alto de Minas, Antioquia), con abundante alofano y alto contenido de materia orgánica.

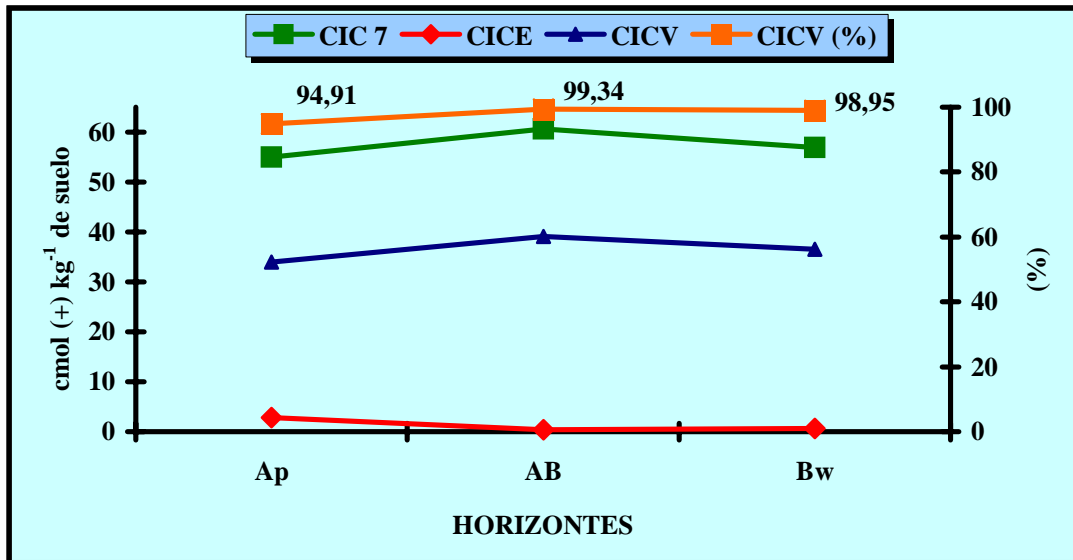
El valor que toma la CIC de un suelo, aparte de las consideraciones hechas en el párrafo anterior, también está fuertemente afectado por el valor del pH al cual se hace la determinación, aumentando el valor de aquella al aumentar el pH, como puede verse en la Figura 13.3 y en la Tabla 13.4; Uehara y Keng (1974) encontraron que cuando el contenido de arcilla y de sesquióxidos de Fe y Al aumenta en el suelo, hay un mayor aumento de la CIC del mismo por unidad de cambio que se de en el pH por encima del PCC.

**TABLA 13.3.** Valores de CIC de diferentes coloides comunes en suelos (Datos tomados de Sánchez, 1981; Fassbender, 1982; Galiano, 1991 y Bohn et al 1993).

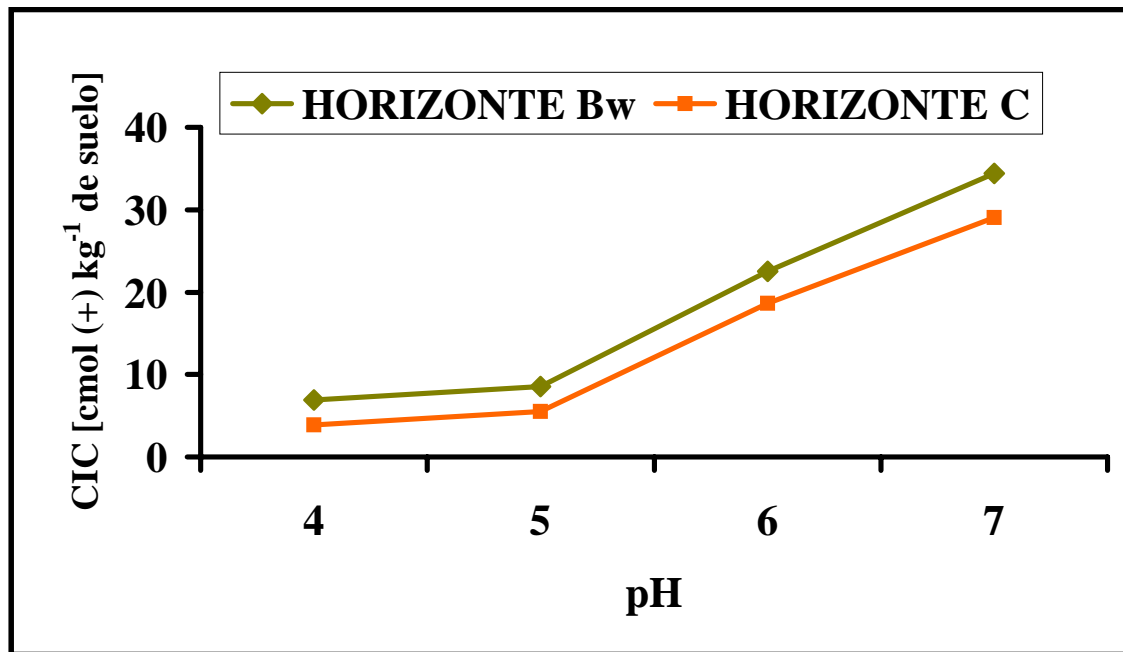
COLOIDE	CIC [ $\text{cmol (+) kg}^{-1}$ de material ]	
	RANGO DE VALORES	VALOR PROMEDIO
Vermiculita	100 - 150	125
Montmorillonita	80 - 120	100
Ilita	20 - 40	30
Clorita	10 - 50	30
Caolinita	3 - 15	9
Halloysita	5 - 10	7.5
Sesquióxidos de Fe y Al amorfos	3 - 10	6.5
Alofano	10 - 150	80
Coloide orgánico	100 - 300	200



**FIGURA 13.1.** Caracterización de la capacidad de intercambio catiónico de un Fluventic Haplustoll de clima cálido seco en el departamento de Antioquia (Resultados de Jaramillo, D. F. 1998, sin publicar).



**FIGURA 13.2.** Caracterización de la capacidad de intercambio catiónico de un Typic Placudand de clima frío húmedo del departamento de Antioquia (Resultados de Jaramillo, D. F. 1998, sin publicar).



**FIGURA 13.3.** Valores de CIC de los horizontes Bw (28% de Ar y 0.8% de materia orgánica) y C (17% de Ar y 0.2% de materia orgánica) de un Typic Eutropepts isotérmico derivado de anfibolita, determinados con  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1N, a diferentes valores de pH (promedios de 3 determinaciones) (Resultados de Jaramillo, D. F. 1990, sin publicar)..

Al observar las gráficas de las Figuras 13.1 y 13.2 se puede apreciar la gran diferencia que hay entre las cargas variables que presentan los suelos analizados; mientras que en el Mollisol la

carga variable representa, en el peor de los casos, un 15% de la CIC 7 del suelo, en el Andisol ese porcentaje es mayor al 95% en todos los horizontes.

En la Tabla 13.4 puede verse el efecto simultáneo que tienen el tipo y contenido de coloides y el cambio de pH en el comportamiento de la CIC del suelo. Como se demostró antes, la CIC del suelo es afectada fuertemente por el pH al cual se hace la determinación, razón por la cual se han estandarizado varios métodos para evaluar esta propiedad.

**TABLA 13.4.** Relación entre la CIC y el pH en un Typic Hapludults arcilloso fino, mezclado, isohipertérmico de la Amazonia colombiana (Resultados inéditos suministrados por el doctor Leonidas Mejía, quien fue uno de los que describieron el perfil del suelo en 1972).

PROFUN- DIDAD (cm)	pH EN AGUA 1:1 V:V	CONTENIDO (%) DE :		CONTENIDO Y TIPO DE ARCILLA*	CIC [cmol (+) kg <sup>-1</sup> de suelo] AL pH:		
		Arcilla	Materia orgánica		Del suelo**	7.0	8.2
0 - 13	4.4	23.5	2.43	K3M1V1	6.5	9.2	12.7
13 - 52	4.6	23.6	0.50	K4M1V1	5.0	6.2	8.0
52 - 105	4.7	40.9	0.22	K3M1V1	9.7	11.5	13.2
105 - 142	4.8	46.3	0.17	K3M1V1	13.3	16.0	17.2
142 - 200	5.0	38.6	0.12	K3M2V1	16.9	19.5	20.4

\* K: Caolinita

M: Montmorillonita

V: Vermiculita

1: < 10 %

2: 10 - 25 %

3: 25 - 50 %

4: > 50 %

\*\* Equivale a la CICE.

## 2.1. DETERMINACIÓN DE LA CIC DEL SUELO

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.

Fundamentalmente se han establecido tres condiciones para hacer la determinación de la CIC del suelo, dependiendo de su pH: una determinación a pH 8.2, útil para suelos alcalinos; otra a pH 7, para suelos que presentan una reacción entre ligeramente ácida y ligeramente alcalina, muy adecuada para suelos con carga permanente y otra para los suelos que definitivamente son ácidos y cuya carga es predominantemente variable. A continuación se describen las metodologías que se siguen en el laboratorio para hacer las diferentes determinaciones.

En la determinación de la CIC del suelo, con cualesquiera de los métodos disponibles, se siguen fundamentalmente tres etapas en todos los métodos (García, 1989):

- 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.

### 2.1.1. Determinación de la CIC a pH 8.2

Con esta determinación 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 et al, 1990), el método de Polemio y Rhoades (García, 1989) y el método por suma de cationes (Soil Survey Laboratory, SSL, 1996).

De los métodos enunciados en el párrafo anterior, a continuación se detalla el método de la suma de cationes, el cual consiste en sumar la cantidad de bases extraídas del suelo mediante lavado con acetato de amonio ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) 1N a pH 7, con la acidez extraída con cloruro de bario-trietanolamina ( $\text{BaCl}_2\text{-TEA}$ ) tamponada a pH 8.2.

Los pasos a seguir para determinar el contenido de bases del suelo, según Motta et al (1990), son:

- Se pesan 5 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm.
- Se coloca la muestra de suelo en un erlenmeyer de 100 mL, se le adicionan 25 mL de  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1N a pH 7 y se agita el conjunto por 30 min.
- Se deja reposar 10 a 15 min el material preparado en el paso anterior. Se filtra, se lava con pequeñas porciones de acetato y se recoge el filtrado en un balón de 200 mL.
- En el filtrado se determinan los contenidos de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ , según los métodos descritos por Motta et al (1990).
- Se calcula el contenido de bases totales (BT) con la Fórmula [13.2].

$$BT = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ \quad [13.2]$$

Para establecer la acidez extractable, se llevan a cabo las siguientes acciones, según Motta et al (1990):

- Se pesan 5 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm.
- Se coloca la muestra en un erlenmeyer de 125 mL. Se le adicionan 15 mL de solución amortiguadora ( $\text{BaCl}_2\text{-TEA}$  a pH 8.2). Se tapa y se deja en reposo el conjunto durante 30 min, agitando ocasionalmente.
- Se filtra lo anterior, utilizando 35 mL de solución amortiguadora para transferir todo el suelo al embudo.
- Se lava el suelo en el embudo con 100 mL de solución de reemplazo (solución amortiguadora enriquecida en  $\text{BaCl}_2$ ), adicionándola en pequeñas porciones sin dejar secar el suelo. Se recoge este filtrado, junto con el anterior.
- Se prepara un blanco con 100 mL de solución de reemplazo, 50 mL de solución amortiguadora, 2 gotas de bromocresol verde y 10 gotas de indicador mixto.
- Se titula el blanco con HCl 0.2N, escogiendo el punto final de la titulación entre el verde y el púrpura.



- Se agregan al filtrado del suelo las mismas cantidades de indicador que al blanco y se titula como se hizo con éste.
- Se calcula la acidez extractable (AE) con la Fórmula [13.3].
- Se calcula la CIC a pH 8.2, mediante la ecuación [13.4].

$$AE = \frac{V - V_1}{\text{peso muestra}} \times N \times 100 \quad [13.3]$$

Donde: 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.

$$CIC\ 8.2 = BT + AE \quad [13.4]$$

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 por Gómez y García (1994), quienes encontraron que fue el mejor de los métodos evaluados para determinar la CIC en este tipo de suelos. García (1989) describe el método como sigue:

- Se pesan 5 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm y se colocan en un erlenmeyer de 200 mL.
- Se agregan 30 mL de una solución de acetato de sodio (NaOAc) 1M a pH de 8.2 y se agita 10 minutos el conjunto, luego se filtra.
- Se lava el suelo 5 veces con 20 mL de NaOAc 1M y se descarta el filtrado.
- Luego, se lava el suelo 10 veces con porciones de 5 mL de etanol al 95%.
- Se vuelve a lavar el suelo 5 veces con porciones de 20 mL de NH<sub>4</sub>OAc 1M a pH 7, recolectando el filtrado en un balón de 250 mL y se completa el volumen con agua destilada.
- Se determina el contenido de Na en el filtrado por absorción atómica.
- Se calcula la CIC del suelo con la relación [13.5].

$$CIC\ 8.2 = \frac{LC \times 250}{\text{peso muestra} \times 10 \times 23} \quad [13.5]$$

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

El IGAC describe una variante del método del acetato de sodio en la cual el contenido de Na se determina por fotometría de llama (Motta et al, 1990).

### 2.1.2. Determinación de la CIC a pH 7

Ésta es la determinación de la CIC que más se ha utilizado en los análisis de caracterización estándar de suelos.

Para esta evaluación hay también varias alternativas analíticas propuestas por el Laboratorio de Levantamiento de Suelos del USDA (SSL, 1996), aunque el método del  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1N y neutro es el más utilizado y, por esta razón, se describe a continuación.

Motta et al (1990) plantean los siguientes procedimientos para llevar a cabo la determinación de esta CIC:

- Se pesan 5 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm.
- Se coloca la muestra de suelo en un erlenmeyer de 100 mL, se le agregan 25 mL de  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1N a pH 7 y se agita 30 min el conjunto.
- Se filtra el conjunto anterior haciendo pequeños lavados con acetato; si se quieren determinar las bases intercambiables, se recoge el filtrado en un balón de 200 mL y se procesa aparte con ese fin.
- Se lava el exceso de amonio con 50 mL de alcohol etílico, aplicando 5 porciones de 10 mL al suelo; los filtrados que se producen en esta etapa se desechan.
- Se lava nuevamente el suelo con 5 porciones de 10 mL de NaCl al 10 % y se recoge el filtrado.
- Se le agregan al filtrado 10 mL de formol del 40% y unas gotas de fenolftaleína; paralelamente, se prepara un blanco con agua destilada, NaCl y formol.
- Se titulan el filtrado y el blanco con NaOH 0.1 N, hasta obtener una coloración rosada pálida.
- Se calcula la CIC del suelo con la Fórmula [13.6].

$$CIC\ 7.0 = \frac{(mLm - mLb) N \times 100}{Pesomuestra} \quad [13.6]$$

Donde: 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.

### 2.1.3. Determinación de la CIC al pH del suelo

Es llamada CIC permanente del suelo por Sánchez (1981) y **CIC real** o **efectiva (CICE)** por varios autores citados por Galiano (1991). Se puede medir desarrollando el método del  $\text{NH}_4\text{OAc}$  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.

Debido a dicho inconveniente, la capacidad de intercambio catiónico se hace igual a la suma de las bases extraídas con NH<sub>4</sub>OAc 1N a pH 7 (BT), más la acidez intercambiable (AI) extraída con KCl 1N. Los métodos analíticos para hacer estas determinaciones se encuentran descritos en Motta et al (1990). La siguiente relación recoge lo dicho antes:

$$CICE = BT + AI = (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+) + (Al^{3+} + H^+) \quad [13.7]$$

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

#### 2.1.4. Determinación de la CIC por colorimetría

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. Las acciones a seguir en esta cuantificación son las siguientes:

- Se prepara una solución de acetato de cobre 0.1M; se hacen 2 o 3 diluciones sucesivas de una alícuota de esta solución patrón; se le calcula la concentración final a cada dilución, así como a la solución patrón y a todas se les determina la absorbancia en un colorímetro a 660 nm.
- Con los resultados del paso anterior, se construye una gráfica de calibración que contenga concentración de cobre vs absorbancia.
- Se pesan 5 g de suelo seco al aire y tamizado a 2 mm y se colocan en un erlenmeyer de 100 mL.
- Se adicionan a la muestra 50 mL de la solución de acetato de cobre 0.1M y se deja en reposo 1 hora, agitando periódicamente.
- Se filtra la suspensión anterior y se lava el exceso de acetato de cobre con 5 o más porciones de 10 mL de alcohol etílico, hasta que no se detecte presencia de cobre en el filtrado que sale del suelo.
- Se retira el erlenmeyer en que se ha venido trabajando y se coloca el embudo con el suelo lavado en un balón volumétrico de 100 mL; se lava nuevamente el suelo con 5 porciones de 10 mL de una solución de cloruro de sodio al 10 %, recogiendo los lavados en el balón.
- Se determina la absorbancia del filtrado recogido a 660 nm en el colorímetro y se determina la concentración de cobre que tiene éste con ayuda de la gráfica de calibración que se hizo al principio del análisis.
- Se calcula la CIC del suelo mediante la relación [13.8].

$$CIC = \frac{Conc. \text{ final } \times Vol.}{\text{peso muestra}} \quad [13.8]$$

Donde: Conc. final: Concentración de cobre en el filtrado, después del desplazamiento con sodio.  
Vol.: Volumen de solución de NaCl adicionado a la muestra.

Con el método descrito 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 también la Fórmula 13.8, 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  $\text{Na}^+$ .

## 2.2. APLICACIONES DE LA CIC DEL SUELO

### 2.2.1. En la caracterización general de la carga del suelo

La magnitud de la carga variable que tenga un suelo puede ser establecida conociendo el valor de la CIC del mismo, determinada a pH 7 y al pH del suelo, mediante la siguiente relación:

$$\boxed{CICV = CIC7 - CICE} \quad [13.9]$$

Estrictamente, según lo que se expuso en el numeral anterior, esta carga variable debe determinarse teniendo como base la CIC determinada a pH 8.2, como lo han hecho Mehlich y Theisen, investigadores citados por Sánchez (1981), de quienes se ha tomado la información que se presenta en la Tabla 13.5.

**TABLA 13.5.** Caracterización de la CIC de algunos coloides de suelos de Kenia (Adaptada y complementada de resultados de Mehlich y Theisen, citados por Sánchez, 1981).

COLOIDE	CIC [ cmol (+) kg <sup>-1</sup> de arcilla ]			CICV (% DE LA CIC TOTAL)
	A pH 8.2	CICE	CICV	
Montmorillonita	118	112	6	5.1
Vermiculita	85	85	0	0
Illita	19	11	8	42.1
Halloysita	18	6	12	6.7
Caolinita	4	1	3	75
Gibbsita	5	0	5	100
Goetita	4	0	4	100

En los resultados expuestos en la tabla anterior puede comprobarse que se cumple lo que se dijo en párrafos anteriores, pues las arcillas 2:1 prácticamente no presentan carga variable, en tanto que los sesquióxidos de Fe y Al y el alofano presentan casi toda (toda en algunos casos) su carga como dependiente del pH.

Es de destacarse de la Tabla 13.5 la alta cantidad de carga variable que genera el alofano, en términos absolutos; estos valores de carga variable se incrementan mucho más en Andisoles poco evolucionados que tengan un alto contenido de materia orgánica.

Jaramillo (1995), tomando como base para los cálculos la CIC 7 ante la escasez de datos de CIC 8.2, encontró en 36 Andisoles del oriente antioqueño con contenido promedio de materia orgánica de 21.89%, valores de CICV promedios de 57.92 cmol (+) kg<sup>-1</sup> de suelo, los cuales correspondieron a un promedio del 93.15% de la CIC 7.

Benavides (1984, 1987) y Benavides y González (1988) también encontraron, en muchos Andisoles de Colombia, una CICV que representaba más del 70 % de la CIC 7 obtenida en esos suelos.

### 2.2.2. En la fertilidad de suelos

Para estimar la capacidad que tiene un suelo de suministrarle algunos nutrientes a las plantas, algunos autores (ICA, 1992; Galiano, 1991) prefieren utilizar el porcentaje de saturación que tienen esos nutrientes en el complejo de intercambio del suelo. Conviene aclarar que ese porcentaje es un valor relativo y no expresa la reserva del elemento que hay en el suelo.

En la situación expuesta en el párrafo anterior se encuentran las bases del suelo, siendo necesario calcular las saturaciones de cada una de ellas, así como la saturación total de las mismas. Para llevar a cabo este cálculo se requiere conocer el valor de la capacidad de intercambio catiónico del suelo, de modo que se pueda resolver la siguiente relación:

$$\boxed{\text{Saturación con } (C^+) = \frac{(C^+)}{CIC7 \text{ ó } CICE} \times 100} \quad [13.10]$$

En la ecuación anterior, (C<sup>+</sup>) representa el catión del cual se quiere conocer su saturación o la suma de bases en el caso de querer conocer la saturación de bases totales del suelo. Obsérvese en la Fórmula 13.10 que en el denominador aparecen dos valores alternativos diferentes de la capacidad de intercambio catiónico del suelo; el valor a utilizar depende del tipo de carga que predomine en el suelo, lo cual puede establecerse evaluando el pH de éste.

Cuando se está trabajando con suelos cuyo pH tiene valores cercanos a 7.0, la saturación debe calcularse con base en la CIC 7; si el suelo presenta un pH ácido, su carga es fundamentalmente dependiente del pH y por lo tanto, según Uehara y Keng (1974) y Moormann (1986) entre otros, las saturaciones deben calcularse teniendo como base la CICE; en algunos casos especiales, la saturación de bases se calcula con respecto a la CIC 8.2, los cuales se dan en el próximo numeral.

De todas formas, cuando se va a utilizar la saturación como índice de disponibilidad de algún elemento se tiene que conocer la CIC que se tomó como base para calcularla y evitar así hacer interpretaciones erradas de los valores (Estrada, 2001).

Otro parámetro importante en el manejo de la fertilidad del suelo es la saturación con Al intercambiable, especialmente en suelos con  $\text{pH} < 5.5$ ; esta determinación ayuda a definir la posibilidad de tener toxicidad de Al en un cultivo específico y se realiza utilizando en el numerador de la Fórmula 13.10 el valor del contenido de Al intercambiable y en el denominador la CICE del suelo en cuestión (Sánchez, 1981; Sánchez y Salinas, 1983).

### 2.2.3. En la clasificación de suelos

En la definición de suelos sódicos se utiliza el porcentaje de sodio intercambiable (**PSI**), es decir, la saturación con este catión, como criterio diferencial. El PSI se calcula con la Fórmula 13.10 colocando en el numerador el contenido de  $\text{Na}^+$  y en el denominador, por tratarse de suelos alcalinos, la CIC 7; el valor crítico para considerar el suelo como sódico es un  $\text{PSI} > 15 \%$ , según SSS (1999, 1998), aunque otros autores como Pizarro (1978) sostienen que algunos suelos con PSI de 7 % ya presentan problemas relacionados con exceso de  $\text{Na}^+$  en el complejo de intercambio.

En el sistema de clasificación taxonómica de suelos del USDA (SSS, 1975, 1998, 1999), la capacidad de intercambio catiónico del suelo o propiedades relacionadas con ella, son ampliamente utilizadas en la definición de algunos de sus taxas. Algunos ejemplos sobresalientes son:

- La separación entre Alfisoles y Ultisoles se hace teniendo en cuenta la saturación de bases que presente el horizonte argílico (Capítulo 20), respecto a la CIC 8.2: si es  $> 35 \%$ , el suelo es Alfisol pero si es  $< 35 \%$ , entonces es Ultisol. Algunos investigadores, como McClelland (1985), han encontrado que el valor de la saturación de bases mayor a 50 %, con CIC 7, es equivalente a un valor de saturación mayor a 35 %, con CIC 8.2, facilitándose la separación de estos dos órdenes de suelos pues el método de determinación de la CIC 7 está estandarizado en la mayoría de los laboratorios de suelos.
- La diferencia entre un epipedón mólico y uno úmbrico está en que el primero tiene una saturación de bases, con la CIC 7, de más de 50 %, en tanto que en el segundo, dicha saturación es menor a ese valor.
- La saturación de bases menor de 50 %, con base en la CIC 7, caracteriza el endopedón sómbrico; así mismo, aquellos suelos distróficos identificados por la partícula Dys, al nivel de gran grupo, tienen una saturación de bases menor de 60 % con base en la CIC 7. Aquellos que tienen saturación de bases mayor al 60 % se identifican por partícula Eu, a este mismo nivel, en la taxonomía.
- Los horizontes kándico y óxico se caracterizan por presentar una  $\text{CIC } 7 \leq 16 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo y una  $\text{CICE} \leq 12 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo.
- Un horizonte diagnóstico argílico se clasifica como nátrico cuando presenta un  $\text{PSI} > 15\%$ .
- Los subgrupos Acrudoxic de varios órdenes taxonómicos se caracterizan por poseer una  $\text{CICE} < 2 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo.

Aparte de lo anterior, Moormann (1986) definió que las **arcillas LAC** en el suelo eran candidas con mezclas variables de sesquióxidos de Fe y Al, cuya principal característica es que presentan una CIC  $7 < 16 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo o una CICE  $< 12 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo.

### 3. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO ANIÓNICO (CIA)

Es la medida de la capacidad que posee un suelo de adsorber aniones intercambiables y es equivalente a la carga positiva del mismo. Según Sánchez (1981), esta capacidad es importante en aquellos suelos con altos contenidos de sesquióxidos de Fe y Al; Moormann (1986) y Bohn et al (1993) también han establecido que este tipo de intercambio es de magnitud importante en suelos tropicales fuertemente intemperizados, sobre todo a pH bajo.

Este tipo de intercambio es importante en el suelo porque afecta algunos nutrimentos para la planta que se presentan en forma aniónica como son  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{BO}_3^-$  y  $\text{MoO}_4^{2-}$ ; además, Bohn et al (1993) establecen que los procesos de intercambio aniónico son muy importantes en problemas de **contaminación de suelos**, puesto que algunos pesticidas, como el 2,4,5-T y el 2,4-D, así como algunos metales pesados como el Cr y el As, se presentan en formas aniónicas en el suelo.

Como ocurre con la CIC, la CIA también está afectada por el valor del pH del medio, aunque en este caso el incremento de carga positiva depende de la disminución del pH: mientras mayor es la acidez del suelo (menor pH), mayor es la cantidad de un determinado anión que es retenida por él.

Según Bohn et al (1993) y Porta et al (1994), los aniones que mejor se ajustan al concepto de intercambio originado en cargas electrostáticas en el suelo son:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ; otros aniones importantes en el suelo, como los fosfatos, están sometidos a procesos de **retención específica**, en la cual las reacciones de intercambio se producen en el interior de los cristales; uno de los efectos más conocidos de la retención específica en suelos es la **fijación** (retención en forma no intercambiable y por lo tanto no disponibles para la planta) de fósforo que se presenta en muchos de ellos, sobre todo cuando son ácidos y presentan alta actividad del  $\text{Al}^{3+}$  y del  $\text{Fe}^{3+}$ .

Sánchez (1981) cita varios trabajos en los cuales se sostiene que Oxisoles y Andepts (Andisoles) pueden retener cantidades apreciables de nitratos y de sulfatos en forma intercambiable y que, además, aniones como sulfatos, fosfatos y silicatos pueden ser adsorbidos fuertemente (fijados) por las superficies de sesquióxidos.

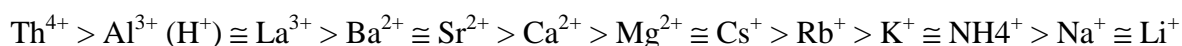
Con respecto a la importancia que tiene el fenómeno de fijación en algunos suelos cabe destacar el hecho de que la fijación de fosfatos es una de las características diagnósticas que definen las propiedades ándicas de los suelos. Un suelo que posea dichas propiedades tiene, entre otras, una capacidad de fijación de fosfatos mayor o igual a 85% (SSS, 1999, 1998). Nótese que lo anterior tiene serias implicaciones en el manejo de estos suelos pues, de cada 100 kg de fósforo que se apliquen como fertilizante, la planta podrá aprovechar sólo 15 kg como máximo, el resto quedará retenido en el suelo.

#### 4. ADSORCIÓN ESPECÍFICA O SELECTIVA

Tanto con los cationes como con los aniones, el enfoque exclusivamente electrostático no siempre explica satisfactoriamente el comportamiento observado en los procesos de intercambio; Bohn et al (1993) dicen que la selectividad observada en algunos coloides por determinados iones se relaciona con los tamaños relativos de los iones hidratados, con la energía de hidratación y con el grado de hidratación de los iones disponibles para el intercambio.

Teniendo en cuenta que en los coloides del suelo se han observado preferencias en la adsorción de los iones que se encuentran en él, se han establecido series en las cuales se ordenan los iones de acuerdo con la facilidad o dificultad con la cual son retenidos por los coloides; estas series se han denominado **series liotrópicas**.

Con base en el tamaño del radio iónico y el de la carga de los cationes, Bohn et al (1993) han propuesto la siguiente serie liotrópica teórica para el intercambio catiónico en el suelo: En el orden en que se exponen los cationes disminuye la fuerza con la cual son retenidos por el coloide:



Fassbender (1982) reporta varias series liotrópicas para cationes, de acuerdo con el tipo de coloide en el cual se esté llevando a cabo el intercambio. Aunque el autor no lo reporta, las series expuestas tienen validez sólo para determinados rangos de pH en cada coloide. Es interesante notar que en todas las series reportadas, el  $\text{Na}^+$  es el catión de menor preferencia en el proceso; las series son:

Illita	$\text{Al}^{3+} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$
Caolinita	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Al}^{3+} > \text{Na}^+$
Montmorillonita	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+$
Materia orgánica	$\text{Mn}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+$

Torres y García (1991), estudiando el intercambio  $\text{Mg}^{2+}$  -  $\text{Ca}^{2+}$  en presencia de  $\text{Na}^+$ , en suelos montmorilloníticos del Valle del Cauca con alta saturación de  $\text{Mg}^{2+}$ , encontraron indicios de selectividad por el  $\text{Ca}^{2+}$  en la mayoría de los suelos que estudiaron. Observaron que la selectividad en el intercambio estuvo afectada por el contenido de materia orgánica, el contenido de carbonatos, el grado de salinidad y la concentración de los cationes. No encontraron efecto del PSI sobre dicha selectividad.

Ayarza y Sánchez (1991) encontraron selectividad en la adsorción de  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{H}^+$  en Ultisoles del Perú y atribuyeron esta selectividad a la presencia de esmectitas interestratificadas con hidróxidos de aluminio, lo cual reducía su expansibilidad no permitiendo la adsorción de otros iones de mayor tamaño.

El autor de este documento no pudo desplazar el  $\text{Cu}^{2+}$  por  $\text{Na}^+$  en los horizontes A y B de Andisoles del departamento de Caldas, durante la determinación de la CIC de aquellos por el



método del acetato de cobre. Atribuyó este comportamiento a la presencia de selectividad por el  $\text{Cu}^{2+}$  en dichos suelos (resultados sin publicar).

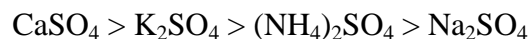
Yu et al (1997), sostienen que los sesquióxidos de Fe, Al y Mn son los principales responsables de la adsorción selectiva de cationes en el suelo y que los cationes que más frecuentemente se ven sometidos a estos procesos son los metales alcalinos y los metales pesados Zn, Co y Cd; concluyeron que la adsorción era selectiva porque observaron que ella se produce a valores de pH entre 3 y 7 y, sabiendo que el PCC de los sesquióxidos involucrados está alrededor de 8, es decir, cuando la carga neta que se está produciendo es cero o es positiva, la atracción simplemente electrostática no explica la adsorción de los cationes.

Yu et al (1997) dicen que la adsorción selectiva de cationes en el suelo puede producir acumulación de metales pesados como Mn, Cu, Co, Ni, Zn, Pb, Cr y V, en ciertas fracciones granulométricas del suelo y, llaman la atención sobre el hecho de que los cationes adsorbidos selectivamente no participan en los procesos de intercambio catiónico, por lo que juegan un importante papel en el control de la disponibilidad y de la toxicidad de iones metálicos para la planta.

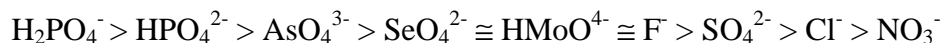
Con respecto a la selectividad en el intercambio aniónico, Fassbender (1982) expone la siguiente serie liotrópica general:



El mismo autor citado en el párrafo anterior reporta una serie de adsorción que se encontró como consecuencia del efecto de la presencia de diferentes iones complementarios en la adsorción de sulfatos, aunque no especifica el suelo en el cual se realizó el estudio:



Moormann (1986) establece que los suelos LAC (de baja actividad) oxídicos presentan la siguiente secuencia de afinidad por el intercambio aniónico:



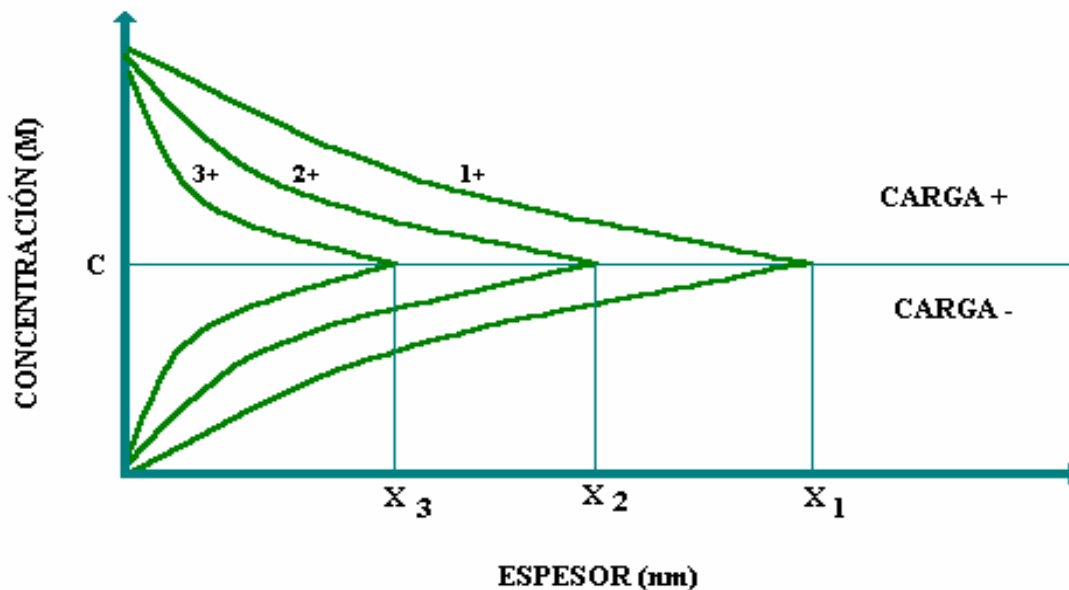
Zhang y Zhao (1997) afirman que la adsorción específica de aniones, en suelos de carga variable, incrementa la cantidad de carga superficial negativa y/o disminuye la cantidad de carga superficial positiva y que, además, estos procesos son de gran importancia en la retención de fosfatos, sulfatos y silicatos en dichos suelos.

## 5. LA DOBLE CAPA DIFUSA

Para tratar de explicar la distribución de los iones alrededor de las superficies cargadas electrostáticamente de los coloides del suelo, se ha diseñado la teoría de la Doble Capa Difusa (**DCD**); con este objetivo se han propuesto diferentes modelos como el de Helmholtz, el de Chapman y Guoy y el de Stern.

El modelo de Helmholtz considera que la distribución de las cargas se hace en dos capas eléctricas paralelas y rígidas; 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; el modelo de **Stern** propone que la DCD 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. Los dos últimos modelos son los que mejor explican la mayoría de los procesos de intercambio en el suelo, aunque ninguno es satisfactorio para todos los casos (Porta et al,1994).

Según Fassbender (1982), el espesor de la DCD depende primordialmente de la carga de los iones involucrados y de la concentración de la solución del suelo. Entre mayor sea la carga de los iones, menor será el espesor de la DCD (Figura 13.4) y, mientras menor sea la concentración de la solución del suelo, más se extiende la DCD (Figura 13.5).



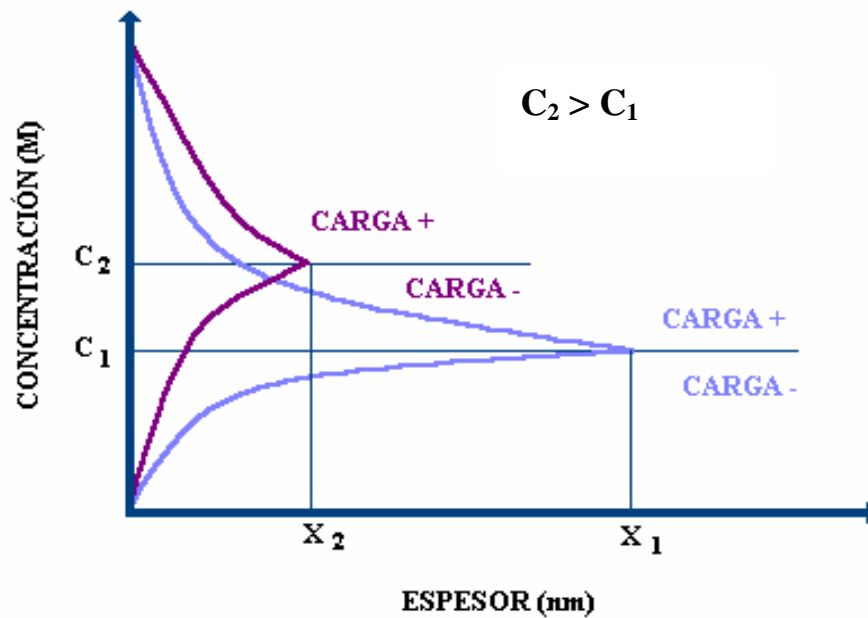
**FIGURA 13.4.** Efecto de la carga del ión sobre el espesor de la DCD (Tomada de Fassbender, 1982).

El espesor de la DCD define la distancia hasta la cual actúan las fuerzas de retención del coloide sobre los iones del suelo, estableciéndose así el espacio que tiene el suelo para acumular los iones intercambiables; aquellos iones que quedan por fuera de la DCD constituyen la **solución externa** o **solución del suelo** y son los que están disponibles para la planta o para ser lixiviados de éste, causando pérdidas de nutrientes en él.

La DCD tiene efectos sobre varias propiedades del suelo como la floculación y la dispersión de coloides y por tanto en la estructura del mismo; además, afecta la determinación del **pH** (se tratará en el siguiente capítulo) y el comportamiento de su fertilidad; de otro lado, prácticas de

manejo de suelos como fertilización, enclamiento, aplicación de enmiendas y/o riego, alteran las características geométricas de la DCD.

Baver et al (1973) sostienen que cuando en los suelos se contrae la DCD se presenta **floculación** de sus coloides, lo que explica porque los suelos salino-sódicos no pierden su estructura a pesar de presentar altos contenidos de  $\text{Na}^+$  intercambiable; lo anterior se debe a que las sales en exceso no dejan expandir la DCD y, por lo tanto, no se generan fuerzas de repulsión entre los coloides que los dispersen.



**FIGURA 13.5.** Efecto de la concentración de la solución del suelo sobre el espesor de la DCD (Tomada de Fassbender, 1982).

El poder dispersante de los cationes monovalentes decrece en el siguiente orden:  $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ ; Schainberg y Kemper (1966) demostraron que en el orden en que aparecen los cationes decrece la cantidad de ellos que es retenida en la capa interna de la DCD y aumenta la cantidad en que se presentan en la zona difusa de la DCD; los cationes de menor tamaño son capaces de retener mayor cantidad de agua de hidratación que los más grandes.

La secuencia que se presentó en el párrafo anterior coincide con el orden en que aumenta el radio iónico de los cationes, por lo que el  $\text{Li}^+$  será el que mayor radio iónico hidratado tendrá; la mayor hidratación expande la DCD creando traslape entre varias DCD y, por tanto, repulsión entre coloides, causando su dispersión.

Cuando se aplica algún tipo de enmienda al suelo, se incrementa la concentración de su solución y, por lo tanto, se contrae la DCD de los coloides; esta situación reduce el espesor de la solución interna y aumenta las posibilidades de tener pérdidas de nutrientes en el suelo por **lixiviación**,

sobre todo cuando se tiene un suelo con una baja CIC; la aplicación de riego produce el efecto contrario pues diluye la solución del suelo y expande la DCD.

### RECORDAR

- El intercambio iónico es un proceso rápido, estequiométrico y reversible.
- El intercambio iónico depende del contenido y tipo de coloides, de la superficie específica, de la densidad de carga superficial, del tipo de ión y de la concentración de los iones.
- La cantidad de cationes que puede intercambiar un suelo se llama Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y la de intercambiar aniones es la Capacidad de Intercambio Aniónico (CIA).
- La CIC se expresa en términos de  $\text{cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo.
- Los procesos de intercambio iónico previenen la pérdida de nutrimentos del suelo por lixiviación.
- La CIC se altera por el pH del medio en el que se mide. Los métodos estándar más utilizados para medir la CIC de suelos de carga permanente son el de suma de cationes, a pH 8.2 y el del acetato de amonio normal y neutro, a pH 7.
- En suelos de carga variable los métodos anteriores sobreestiman la CIC. En éstos se usa la CIC efectiva (CICE), obtenida como la suma de las bases más la acidez, intercambiables.
- La CIC es una propiedad ampliamente utilizada en fertilidad y en taxonomía de suelos.
- En los suelos se presentan fenómenos de retención de iones que no se explican por la presencia de cargas electrostáticas. Éstos se conocen como adsorción selectiva o específica.
- Los iones retenidos por adsorción selectiva no participan en los procesos de intercambio y son causantes de pérdidas de nutrimentos por fijación y de la acumulación tóxica de iones metálicos pesados en el suelo. El caso más importante de fijación es el del fósforo.
- La doble capa difusa (DCD) es un modelo teórico para explicar los mecanismos involucrados en el intercambio iónico. El espesor de la DCD depende de la concentración de la solución del suelo y de la carga de los iones.

### BIBLIOGRAFÍA

- AYARZA, M. A. y P. S. SÁNCHEZ. 1991. Importancia de los minerales 2:1 interestratificados en la retención de potasio en un Ultisol de la Amazonia peruana. Suelos Ecuatoriales 21 (2): 65-68.
- BAVER, L. D., W. H. GARDNER y W. R. GARDNER. 1973. Física de suelos. U.T.H.E.A. México. 529 p.
- BENAVIDES, G. 1984. Cuantificación del material amorfo en algunos suelos derivados de cenizas volcánicas y su relación con los parámetros de la taxonomía de suelos. Suelos Ecuatoriales 14 (1): 272-279.
- BENAVIDES, G. 1987. Determinación de las propiedades ándicas en algunos suelos de Colombia. Suelos Ecuatoriales 17 (2): 332-337.

- BENAVIDES, G. y E. GONZÁLEZ. 1988. Determinación de las propiedades ándicas y clasificación de algunos suelos de páramo. *Suelos Ecuatoriales* 18 (1): 58-64.
- BOHN, H. L., B. L. MCNEAL y G. A. O'CONNOR. 1993. *Química del suelo*. Limusa. México. 370 p.
- ESTRADA, G. 2001. Disponibilidad de calcio, magnesio y azufre, su análisis en suelos y plantas y su interpretación. **En:** Los elementos secundarios (Ca, Mg, S) y el silicio en la agricultura. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS). Bogotá. pp 85-104.
- FASSBENDER, H. W. 1982. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. IICA. San José. Costa Rica. 398 p.
- GALIANO, F. 1991. Capacidad de intercambio catiónico y aniónico, bases de cambio y saturaciones. **En:** 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.
- GÓMEZ, C. y A. GARCÍA. 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.
- INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO (ICA). 1992. Fertilización en diversos cultivos. 5ª. aproximación. Manual de asistencia técnica No. 25. ICA. Bogotá. 64 p.
- JARAMILLO, D. F. 1995. Los Andisoles del Oriente Antioqueño. Propiedades químicas y fertilidad. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 35 p.
- JI, G. L. and H. Y. LI. 1997. Electrostatic adsorption of cations. **In:** Chemistry of Variable Charge Soils. Yu T. R. editor. Oxford University Press Inc. New York. pp: 64-111.
- McCLELLAND, J. 1985. Circular letter No. 4, august 1976 ICOMLAC. **In:** Excerpts from the circular letters of ICOMLAC 1985. Technical monograph No. 8 SMSS. University of Hawaii. Washington. pp 40.
- MOORMANN, F. R. 1986. Classification of Alfisols and Ultisols with low activity clays. **In:** Proceedings of a Symposium on Low Activity Clay (LAC) soils. SMSS technical monograph No. 14. Las Vegas. pp 1-12.
- MOTTA de M. B. et al. 1990. *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. 5ª. Ed. IGAC. Bogotá. 502 p.
- PIZARRO, F. 1978. *Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos*. Editora Agrícola Española S. A. Madrid. 521 p.
- PORTA, J.; M. LÓPEZ – ACEVEDO y C. ROQUERO. 1994. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 807 p.
- SÁNCHEZ, P. 1981. *Suelos del trópico: Características y manejo*. IICA. San José. Costa Rica. 534 p.
- SÁNCHEZ, P. y J. SALINAS. 1983. *Suelos ácidos: Estrategias para su manejo con bajos insumos en América Tropical*. SCCS. Bogotá. 93 p.
- SCHAINBERG, I and W. D. KEMPER. 1966. Hydration status of adsorbed cations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30: 707-713.
- SOIL SURVEY LABORATORY (SSL). 1996. *Soil survey laboratory methods manual*. Soil survey investigations report N°. 42, version 3.0. USDA. 693 p.

SOIL SURVEY STAFF (SSS). 1975. Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agricultural handbook No. 436. USDA. Washington. 754 p.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2<sup>a</sup>. Ed. Agriculture Handbook N° 436. Soil Survey Staff. Washington D. C. 869 p.

SOIL SURVEY STAFF (SSS). 1998. Keys to soil Taxonomy. 8<sup>a</sup>. Ed. Washington D. C. 326 p.

TORRES, J. y A. GARCÍA. 1991. Intercambio catiónico magnesio-sodio en algunos suelos del Valle del Cauca. Suelos Ecuatoriales 21 (2): 33-38.

UEHARA, G. y J. KENG. 1974. Relaciones entre la mineralogía y el manejo de los suelos en la América Latina. **En:** Manejo de suelos en la América Tropical. North Carolina State University. Raleigh. pp 357-370.

YU, T. R.; H. Y. SUN and H. ZHANG. 1997. Specific adsorption of cations. **In:** Chemistry of Variable Charge Soils. Oxford Yu T. R. editor. University Press Inc. New York. pp: 140-174.

ZHANG, X. N. and A. Z. ZHAO. 1997. Surface charge. **In:** Chemistry of Variable Charge Soils. Yu T. R. editor. Oxford University Press Inc. New York. pp: 17-63.

## AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuáles son las propiedades del cambiador que controlan el intercambio iónico en el suelo?. ¿Cuáles las del ión?
2. Confirmar las unidades de densidad de carga de la Tabla 13.1.
3. ¿Cómo interviene el tamaño de los iones en los procesos de intercambio del suelo?
4. ¿Qué significa adsorber?
5. ¿Por qué es importante el intercambio iónico en el suelo?
6. ¿Cuáles son las bases del suelo?
7. ¿Qué significa la abreviatura CIC?. ¿En qué unidades se expresa la CIC?
8. ¿Cuál grupo de filosilicatos posee los mayores valores de CIC?
9. ¿Qué importancia tiene el coloide orgánico en la CIC del suelo?
10. ¿Cómo se relacionan la CIC y el pH del suelo?
11. Diga los métodos que se han estandarizado para medir la CIC del suelo. ¿En qué condiciones se recomienda el uso de cada uno de ellos?
12. En la mayoría de los Andisoles de Colombia, ¿cuál es el método más recomendable para evaluar la capacidad de intercambio catiónico que poseen?. ¿Por qué?
13. ¿Un suelo FA<sub>r</sub> tiene mayor capacidad de intercambio catiónico que uno FA, si ambos tienen igual contenido de materia orgánica?
14. Dos suelos que tengan iguales contenidos de arcilla y de materia orgánica ¿tienen igual CIC?
15. Mencionar 3 casos específicos en los cuales la CIC es aplicada en la clasificación de suelos.
16. ¿Qué es CIA?. Diga un nutrimento que sea especialmente afectado por ella. ¿En qué orden de suelo es importante la fijación de fósforo?
17. ¿Qué le pasará al espesor de la DCD del suelo cuando éste es fertilizado?. ¿Y cuando es regado?. ¿Por qué?

## EVALUACIÓN

1. Discuta la relación que puede haber entre la CIC y el punto de carga cero del suelo.

2. Las reacciones de intercambio en el suelo son estequiométricamente equivalentes. ¿Cuántos gramos de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  se requieren para intercambiar 2 meq de  $\text{Na}^+$  en el suelo, asumiendo una eficiencia del 100 %?. (R: 0.04 g, 0.0243 g, 0.0782 g, 0.018 g, 0.0372 g, respectivamente).
3. Diez gramos de suelo se lavan con 100 mL de una solución 1 N de acetato de amonio y en el filtrado se obtienen  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{Ca}^{2+}$ . ¿A cuántas  $\text{cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo corresponde ese contenido de  $\text{Ca}^{2+}$ ?. (R:  $0.02 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo).
4. ¿Cuánta es la CIC de un suelo que presenta 70 % de caolinita y 10 % de materia orgánica?. (R:  $26.3 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo).
5. Un suelo que presentó una CIC total de  $30 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo, tiene 8 % de materia orgánica; ¿cuánta es la contribución de la arcilla a la CIC de ese suelo?.(R:  $14 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo).
6. Un suelo con 42 % de arcilla y 7 % de materia orgánica, presenta la siguiente composición de la arcilla: 30 % de Montmorillonita, 25 % de Vermiculita, 20 % de Illita, 15 % de Clorita y 10% de Caolinita. ¿Cuál es el valor de la CIC de ese suelo?.(R:  $41.68 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo).
7. Los análisis de laboratorio de los primeros 30 cm de un suelo dieron los siguientes resultados:
  - a. CIC 7:  $34.5 \text{ cmol.kg}^{-1}$  de suelo
  - b.  $\text{Al}^{3+}$ :  $4.8 \text{ meq (100 g de suelo)}^{-1}$
  - c.  $\text{Ca}^{2+}$ :  $1.2 \text{ meq (100 g de suelo)}^{-1}$
  - d.  $\text{Mg}^{2+}$ :  $0.7 \text{ meq (100 g de suelo)}^{-1}$
  - e.  $\text{K}^+$ :  $0.2 \text{ meq (100 g de suelo)}^{-1}$
  - f.  $\text{Na}^+$ :  $0.02 \text{ meq (100 g de suelo)}^{-1}$
  - g. Densidad aparente:  $1.2 \text{ Mg m}^{-3}$
 Calcular:
  - i. CICE. (R:  $6.92 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo).
  - ii. CICV. (R:  $27.58 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo).
  - iii. Saturación de bases. (R: 30.64 %).
  - iv. Saturación con aluminio. (R: 69.36 %).
  - v. PSI. (R: 0.29 %).
  - vi.  $\text{Kg ha}^{-1}$  de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  que hay en el suelo. (R: 864, 306.31, 16.56, 281.52, respectivamente).
8. Cien gramos de suelo presentaron un contenido de 4 meq de  $\text{K}^+$ , 6 meq de  $\text{Ca}^{2+}$  y 2 meq de  $\text{Mg}^{2+}$ . ¿Cuál es la CIC de ese suelo en  $\text{mmol (+) kg}^{-1}$  de suelo?. (R:  $120 \text{ mmoles (+) kg}^{-1}$  de suelo).
9. Para que un suelo sea clasificado como Oxic Dystrudept, debe cumplir, entre otros requisitos, que tenga una CIC, medida en acetato de amonio 1 N a pH 7, menor a  $24 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de arcilla; los análisis de laboratorio de un suelo reportan una CIC de  $18 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo y contenidos de 5 % de materia orgánica y 12 % de arcilla; suponiendo que todos los otros requisitos se cumplen. ¿Dicho suelo se clasificará como Oxic Dystrudept?. Sustentar la respuesta con los cálculos correspondientes. (R: No, tiene una CIC de  $66.67 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de arcilla).
10. Para los primeros 30 cm de un suelo se obtuvieron los siguientes resultados en los análisis de laboratorio a los cuales se sometió:
  - a. Contenido de arcilla: 35 %.
  - b. Contenido de materia orgánica: 12.5%.
  - c.  $\text{Al}^{3+}$ :  $3.1 \text{ meq (100 g de suelo)}^{-1}$ .
  - d.  $\text{Ca}^{2+}$ :  $2.2 \text{ meq (100 g de suelo)}^{-1}$ .
  - e.  $\text{Mg}^{2+}$ :  $1.3 \text{ meq (100 g de suelo)}^{-1}$ .
  - f.  $\text{K}^+$ :  $0.9 \text{ meq (100 g de suelo)}^{-1}$ .
  - g. Densidad aparente:  $1.2 \text{ Mg m}^{-3}$ .
  - h. CIC 7:  $21.2 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$  de suelo.
 Se desea:
  - i. Expresar los contenidos de bases en  $\text{kg de óxido ha}^{-1}$ . (R:  $2\ 217 \text{ kg CaO ha}^{-1}$ ,  $936 \text{ kg MgO ha}^{-1}$ ,  $1\ 522.80 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ ).

- ii. Determinar la relación Ca: Mg: K, con base en la saturación de los cationes. (R: 2.4: 1.4: 1).
- iii. Conocer cuál es el tipo de arcilla más probable en este suelo. Sustentar la respuesta con los cálculos correspondientes. (R: Caolinita).
- iv. Saber cuántos kg ha<sup>-1</sup> de KCl comercial (60% de K<sub>2</sub>O) deben aplicarse al suelo para llevar su contenido de K<sup>+</sup> a un valor de 2 cmol (+) kg<sup>-1</sup> de suelo. (R: 3 100 kg).
- v. Conocer la nueva relación Ca: Mg: K del suelo, después de aplicarle el anterior producto. (R: 1.69: 1: 1.34).

11. De un suelo que presentó una CIC 7.0 de 34.3 cmol (+) kg<sup>-1</sup> de suelo y una CICE de 33.2 cmol (+) kg<sup>-1</sup> de suelo, ¿qué puede decirse acerca de su pH?. Su mineralogía? Su tipo de carga?. Explique.

12. ¿Cuál es el valor de la CIC de un suelo, medida por el método colorimétrico, si en el proceso de medida se obtuvo la siguiente información:

a. Curva de calibración:

Concentración de Cu <sup>2+</sup> (mol L <sup>-1</sup> )	Absorbancia
0.10	0.225
0.08	0.194
0.04	0.167
0.02	0.092

b. Absorbancia a 660 nm en el extracto de la última filtración: 0.115. (R: 11.4 cmol (+) kg<sup>-1</sup> de suelo).

13. El horizonte A (25 cm) de un suelo tiene una densidad aparente de 1.2 Mg m<sup>-3</sup> y unos contenidos de Ca<sup>2+</sup> de 300 ppm, de Mg<sup>2+</sup> de 120 ppm, de K<sup>+</sup> de 80 ppm, de Na<sup>+</sup> de 20 ppm y de Al de 2 meq/100 g de suelo. ¿Cuál es la CICE de ese suelo?. (R: 4.7752 cmol (+) kg<sup>-1</sup> de suelo).