

LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

PARTE 4

LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

PRINCIPIOS DE QUÍMICA Y COLOIDES DEL SUELO

- ❖ Conceptos básicos
- ❖ Soluciones
- ❖ El enlace químico
- ❖ Los coloides del suelo

EL INTERCAMBIO IÓNICO

- ❖ Factores que controlan el intercambio iónico
- ❖ Capacidad de intercambio catiónico (CIC)
- ❖ Capacidad de intercambio aniónico (CIA)
- ❖ Adsorción específica o selectiva
- ❖ La doble capa difusa

LA REACCIÓN DEL SUELO

- ❖ El pH
- ❖ Suelos ácidos
- ❖ Suelos básicos



Fassbender (1982)¹ define la química de suelos como aquella parte de la ciencia del suelo que estudia la composición, las propiedades y las reacciones químicas de los suelos.

Los esfuerzos mayores de aplicación de esta parte de la ciencia del suelo han estado dirigidos a tratar de explicar y/o resolver problemas relacionados con la dinámica de los nutrimentos vegetales y con la fertilidad del suelo. Estos aspectos escapan al alcance de este texto, que está dedicado a explorar áreas más básicas del conocimiento de los suelos, por lo cual no debe esperarse que aquí se resuelvan dichos problemas.

¹ FASSBENDER, H. W. 1982. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. San José. Costa Rica. 398p.

PRINCIPIOS DE QUÍMICA Y COLOIDES DEL SUELO

CAPÍTULO 12

CONTENIDO

- ❖ Conceptos básicos
- ❖ Soluciones
 - Concentración de una solución
 - Porcentaje (%)
 - Molaridad
 - Molalidad
 - Normalidad
 - Partes por millón o por billón
 - Solvatación
- ❖ El enlace químico
 - Enlace iónico
 - Enlace covalente
 - Enlace de van der Waals
- ❖ Los coloides del suelo
 - La carga permanente
 - La carga variable
 - Importancia de la carga de los coloides del suelo

OBJETIVOS

Repasar algunos conceptos básicos de química

Entender el comportamiento de los coloides en el suelo



e hará, en esta parte, el repaso de algunos conceptos fundamentales de la química aplicables al estudio de las propiedades químicas del suelo.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

De Keenan y Wood (1971) se extraen las siguientes definiciones:

- **Átomo:** Es la mínima parte de un elemento que conserva las propiedades de éste; el átomo está compuesto de partículas subatómicas, de las cuales las más conocidas son los **electrones:** Partículas cargadas negativamente; los **protones:** Partículas cargadas positivamente y los **neutrones:** Partículas neutras.
- **Ión:** Son átomos o moléculas que pierden o ganan electrones por lo cual adquieren una determinada carga; si ganan electrones, adquieren carga negativa y se denominan **aniones** (Cl^- , NO_3^-); si pierden electrones, adquieren carga positiva y se llaman **cationes** (Na^+ , NH_4^+).

Los principales **cationes** que se encuentran en el suelo, en orden ascendente de magnitud de su carga, son: H^+ , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Si^{4+} . Los **aniones** más frecuentes en el suelo, también en orden ascendente de la magnitud de su carga, son: OH^- , NO_3^- , Cl^- , HCO_3^- , H_2PO_4^- , H_2BO_3^- , F^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HPO_4^{2-} , MoO_4^{2-} , SeO_4^{2-} .

- **Molécula:** Es la mínima parte de una sustancia que está compuesta de un arreglo específico de átomos.
- **Sustancia iónica:** Sustancia que está compuesta de un arreglo específico de iones (Restrepo, 2001).
- **Número de oxidación :** También llamado **valencia**, es una medida de la capacidad que tiene un átomo para combinarse; su valor para un determinado átomo puede establecerse como el número de hidrógenos con los cuales se puede combinar o como el número de hidrógenos que fueron reemplazados en la molécula por otros átomos; por ejemplo, en el HCl, el Cl tiene un número de oxidación de -1 puesto que está combinado con un solo hidrógeno.
- **Mol:** Es el equivalente de tener 6.02×10^{23} unidades: átomos, iones o moléculas, de una sustancia; para expresarlas en unidades de masa, se hace igual al peso atómico, al peso fórmula o al peso molecular, respectivamente, expresados en gramos.
- **Peso atómico:** Es el peso promedio de todos los isótopos que tiene un átomo; se encuentra definido en la tabla periódica de los elementos químicos; se acepta que el peso de un átomo es igual al de los iones que forma, ya que la masa de los electrones es despreciable.
- **Peso fórmula:** Es la suma de los pesos atómicos de los iones que componen una sustancia iónica, expresado en gramos; si la sustancia es una molécula, el peso fórmula se llama **peso molecular** (Restrepo, 2001).
- **Equivalente:** Es el peso atómico o iónico, en gramos, dividido por el número de oxidación del átomo o del ión correspondiente; por ejemplo, el peso de un equivalente de Ca^{2+} es: 40 (peso atómico) $\div 2$ (número de oxidación) = 20 g.

En la Tabla 12.1 se presentan los valores de algunas de las propiedades definidas anteriormente, para los principales iones que se encuentran en el suelo.

TABLA 12.1. Algunas características químicas de los iones más frecuentes del suelo.

ION		NÚMERO DE OXIDACIÓN	PESO (g)	
SÍMBOLO	NOMBRE		IÓNICO	DE 1 EQUIVALENTE
H ₃ O ⁺ , (H ⁺)	Hidronio	1	1.00	1.00
K ⁺	Potasio	1	39.10	39.10
Na ⁺	Sodio	1	22.99	22.99
NH ₄ ⁺	Amonio	1	18.00	18.00
Ca ²⁺	Calcio	2	40.08	20.04
Mg ²⁺	Magnesio	2	24.31	12.16
Mn ²⁺	Manganeso (II)	2	54.94	27.47
Cu ²⁺	Cobre (II) o Cúprico	2	63.54	31.77
Zn ²⁺	(Zinc) Cinc (II)	2	65.37	32.69
Fe ²⁺	Hierro (II) o Ferroso	2	55.85	27.93
Al ³⁺	Aluminio	3	26.98	8.99
Fe ³⁺	Hierro (III) o Férrico	3	55.85	18.62
Si ⁴⁺	Sílice	4	28.09	7.02
OH ⁻	Hidroxilo	1	16.99	16.99
NO ₃ ⁻	Nitrato	1	62.00	62.00
Cl ⁻	Cloruro	1	35.45	35.45
HCO ₃ ⁻	Bicarbonato	1	61.01	61.01
F ⁻	Fluoruro	1	19.00	19.00
SO ₄ ²⁻	Sulfato	2	96.06	48.03
CO ₃ ²⁻	Carbonato	2	60.01	30.01
BO ₃ ³⁻	Borato	3	58.81	19.60
PO ₄ ³⁻	Fosfato	3	94.97	31.66

2. SOLUCIONES

La química del suelo se desarrolla fundamentalmente obedeciendo a los principios de las soluciones. Una solución es una **mezcla homogénea** de moléculas, átomos o iones de dos o más sustancias diferentes; el hecho de que sea una mezcla homogénea implica que sus componentes no se separan en fases y que, por lo tanto, no pueden identificarse a simple vista.

Las soluciones adquieren propiedades diferentes a las de los componentes individuales que las formaron, aunque pueden conservar semejanzas con algunas de las propiedades del componente principal de la solución.

Las soluciones más comunes son las binarias, es decir, formadas por dos componentes; en ellas se presentan dos sustancias básicas: El soluto y el solvente; el **soluto** es la sustancia que se está disolviendo y el **solvente** es la sustancia que disuelve el soluto, es decir, es el medio de dispersión de la solución.

2.1. CONCENTRACIÓN DE UNA SOLUCIÓN

Una de las características que hay que definir de una solución es su concentración, es decir, determinar la cantidad de soluto hay en una determinada cantidad de solvente; esta relación puede expresarse en términos gravimétricos (en peso) o volumétricos y hay varias formas de hacerlo.

2.1.1. Porcentaje (%)

Expresado **graviméricamente (P/P)**, establece el peso que hay de soluto, con respecto al peso que se requiere de solvente, para ajustar un peso de 100; en una solución acuosa de NaCl al 10%, por peso, habrán 10 g de NaCl disueltos en 90 gramos de agua, por cada 100 g de solución.

Voluméricamente (V/V), es el método más empleado para hacer soluciones con sustancias líquidas, ya que es más fácil medir sus volúmenes que sus pesos; en este caso, el porcentaje indica el volumen de soluto que hay en 100 volúmenes de solución; por ejemplo, en una solución acuosa de isopropanol al 10% hay 10 mL de alcohol por cada 100 mL de solución.

También se pueden expresar los porcentajes combinando peso y volumen. Se expresa como (P/V) o como (V/P); en el primer caso es el peso de soluto por 100 volúmenes de solución: por ejemplo, una solución de NaCl al 10% (P/V) indica que hay 10 g de la sal en 100 mL de solución. La relación (V/P) indica que hay un determinado volumen de soluto por 100 g de solución: una solución de ácido acético al 10% (V/P) dice que hay 10 mL de ácido en 100 g de solución.

2.1.2. Molaridad (*M*)

Determina la concentración como el número de moles de soluto que hay en un litro de solución; en una solución acuosa 1 *M* de NaCl hay 1 mol de NaCl por litro de solución, es decir, hay 58.44 g de sal en un litro de solución; también puede decirse que en ese litro de solución se encuentran disueltos 6.02×10^{23} moléculas de NaCl o 6.02×10^{23} iones de Na^+ y 6.02×10^{23} iones de Cl^- .

2.1.3. Molalidad (*m*)

Determina la concentración como el número de moles de soluto que hay disueltas en un kilogramo de solvente. En una solución acuosa 1 *m* de NaCl hay 1 mol (58.44 g) de NaCl disueltos en 1 kg de agua que es el solvente.

2.1.4 Normalidad (*N*)

Indica los equivalentes de soluto que hay disueltos en un litro de solución; una solución acuosa 1 *N* de NaCl tendrá 1 equivalente (58.44 g) de sal disuelto en 1 L de solución. Una solución acuosa 1 *N* de CaCl_2 tiene 1 equivalente ($110.98 \text{ g} \div 2 = 55.49 \text{ g}$) de cloruro por cada litro de solución.

2.1.5. Partes por millón (ppm) o por billón (ppb)

Estas unidades se utilizan para expresar bajas concentraciones; ellas implican que hay un determinado número de partes de soluto por un millón (10^6) o por un billón (10^{12}) de partes de solución; si en un suelo hay 10 ppm de fósforo, quiere decir que hay 10 kg de fósforo en 10^6 kg de suelo. En soluciones acuosas, ppm es equivalente a mg L^{-1} ; si se tiene una solución acuosa con 2 ppm de KCl, se tienen 2 mg de KCl disueltos en 1 L de solución.

2.2. SOLVATACIÓN

Éste es el fenómeno mediante el cual interactúan las moléculas del solvente con las del soluto en una solución para formar unos arreglos cuyos componentes no están unidos muy firmemente; este mecanismo de formación de soluciones es muy importante en compuestos que forman iones al disociarse o en moléculas **polares**: moléculas con un extremo con carga + y el otro con carga -.

Cuando se está trabajando con soluciones acuosas, el fenómeno de solvatación se conoce como **hidratación**, pudiéndose considerar un ión hidratado como una esfera rodeada por una capa de moléculas de agua.

Según Fassbender (1982), la cantidad de moléculas de agua que atrae un ión al hidratarse depende del tamaño de su carga (a mayor cantidad de cargas, mayor cantidad de hidratación) y, dentro de un grupo de iones con igual cantidad de cargas, el radio iónico define la cantidad de moléculas de hidratación que puede tener el ión, siendo mayor el número de moléculas en aquellos iones de menor tamaño, como puede comprobarse con los datos de la Tabla 12.2.

TABLA 12.2. Tamaño de diferentes iones y cantidad de agua de hidratación que pueden retener.

ION	RADIO (nm)*	MOLÉCULAS DE AGUA POR ION**	ION	RADIO (nm)*	MOLÉCULAS DE AGUA POR ION**
Li ⁺	0.068	6	Mg ²⁺	0.066	9 a 13
Na ⁺	0.097	4	Ca ²⁺	0.099	8 a 10
K ⁺	0.133	2.5	Ba ²⁺	0.134	6 a 8

* Tomados de Bohn et al (1993). ** Tomados de Scheffer y Schachtschabel, citados por Fassbender (1982).

El proceso de hidratación de los iones convierte la solución del suelo en una fina película acuosa que rodea las partículas sólidas del mismo, teniendo importantes efectos sobre los procesos de intercambio ya que, como puntualiza Fassbender (1982), a mayor agua de hidratación, menor es la fuerza de atracción que pueden ejercer los cambiadores (coloides) sobre los iones.

3. EL ENLACE QUÍMICO

Como se mencionó al principio de este capítulo, los átomos están compuestos de electrones, protones y neutrones, principalmente; debido a la presencia de cargas eléctricas diferentes en aquellas partículas, ellas se distribuyen ordenadamente en el átomo: En el centro (núcleo) se encuentran los protones y neutrones y, girando alrededor de ese núcleo, los electrones.

Los electrones se distribuyen alrededor del núcleo ocupando regiones específicas que se conocen como **niveles de energía**, los cuales son 7 como máximo; los niveles se subdividen en **subniveles** que se identifican con las letras minúsculas **s, p, d y f**; cada subnivel está compuesto por un número variable de **orbitales**, cuya cantidad máxima es 1, 3, 5 y 7 respectivamente; el número máximo de electrones que pueden acomodarse en cada subnivel es 2, 6, 10 ó 14, respectivamente (Keenan y Wood, 1971). Según Restrepo (2001), un orbital es la región del espacio donde hay una alta probabilidad de encontrar un electrón; él tiene energía y forma características.

Los electrones van ocupando los subniveles de adentro hacia fuera, completando los cupos máximos permisibles en cada uno de ellos y solamente los gases nobles: Helio (He), Neón (Ne), Argón (Ar), Criptón (Kr), Xenón (Xe) y Radón (Rn) tienen su último subnivel lleno con el número máximo de electrones permisible, característica que los hace prácticamente inertes desde el punto de vista de su reactividad química.

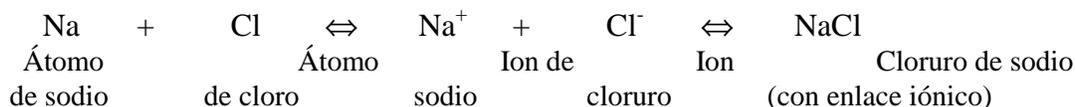
Con los demás átomos, quedan subniveles externos que no alcanzan a completar el número de electrones permisible, por lo cual tienen la posibilidad de reaccionar con otros átomos por medio de estos electrones externos; esta interacción de electrones genera unas fuerzas de atracción conocidas como **enlaces químicos**, que son las que mantienen unidos los átomos en los compuestos; los electrones involucrados en el enlace se llaman **electrones de valencia** (Restrepo, 2001).

Cuando dos átomos se combinan se genera una interacción entre los electrones de sus orbitales externos, lo cual conduce a la formación de un compuesto con mayor estabilidad química que la de sus componentes individuales; para lograr esta estabilidad, los átomos pueden compartir o pueden transferir los electrones externos, produciendo diferentes tipos de enlaces.

3.1. ENLACE IÓNICO

Es el enlace químico que se produce por transferencia de electrones de un ion a otro, es decir, que un ion pierde electrones y el otro los gana, con lo cual se genera la sustancia iónica final; también se le llama enlace **electrovalente**, ya que su formación obedece a la diferencia de carga eléctrica.

Según Keenan y Wood (1971), cuando un elemento metálico se combina con uno no metálico, los átomos del metal pierden los electrones y los del no metal los ganan. En la formación de NaCl, desde el punto de vista de los enlaces químicos, se puede escribir la siguiente reacción:



Según Bohn et al (1993), la fuerza de estos enlaces es alta y carece de orientación, es decir, que se ejerce uniformemente en todas las direcciones; además, este tipo de enlace predomina en una alta cantidad de cristales inorgánicos. Según Besoain (1985) este tipo de enlace es frecuente en filosilicatos que presentan carga negativa que se encuentra balanceada por cationes ubicados en la entrecapa, como en las micas que tienen K^+ o Ca^{2+} en dicho espacio.

Bohn et al (1993) establecen una variante de los enlaces iónicos cuando en este enlace participa el hidrógeno con otros dos átomos de alta **electronegatividad** (capacidad de un átomo para atraer electrones) como oxígeno, fluor o nitrógeno, por ejemplo. Este enlace, llamado **enlace de hidrógeno**, es débil y participa en las estructuras cristalinas de los filosilicatos uniendo láminas de tetraedros con las de octaedros ubicándose entre los planos de los oxígenos y de los OH⁻ (Besoain, 1985).

3.2. ENLACE COVALENTE

Es el tipo de enlace que se forma entre átomos que comparten electrones; este enlace se produce, según Bohn et al (1993), entre átomos iguales, como en el caso del F₂, o entre átomos de características eléctricas similares, como en FCl.

Bohn et al (1993) también apuntan que el enlace covalente es fuerte y que tiene orientación; además, aquellas moléculas unidas por este tipo de enlace tienen poca tendencia a ionizarse, aunque es común en radicales iónicos, como por ejemplo en el SO₄²⁻

3.3. ENLACE DE van der WAALS

Éste es un enlace más entre moléculas que entre átomos. Se presenta entre moléculas que están en contacto pero que no están químicamente entrelazadas y es importante sólo cuando las moléculas están muy cercanas unas de otras: distancia < 5 Å (Besoain, 1985).

Según Bohn et al (1993) es un enlace débil que se origina por cargas residuales de las moléculas; es frecuente entre moléculas orgánicas y es escaso entre los minerales del suelo, aunque puede presentarse en algunos filosilicatos uniendo las láminas que los componen.

Bohn et al (1993) y Besoain (1985) coinciden en afirmar que en la naturaleza se presentan, aparte de los enlaces definidos anteriormente, todas las posibles combinaciones entre ellos; además, la combinación de enlaces es la manera como se definen las estructuras de los minerales.

4. LOS COLOIDES DEL SUELO

Una partícula coloidal es aquella que posee un tamaño menor de 0.001 mm de diámetro (1000 nm), dimensiones responsables de la alta **superficie específica** que las caracteriza; poseen, además, **carga eléctrica** que les confiere una alta reactividad química.

La superficie específica de un cuerpo es el área total que expone, es decir, es el área externa que posee ese cuerpo por unidad de peso del mismo; así, la superficie específica de un cubo de 1 g de peso, será la suma de las áreas de las seis caras externas que posee ese cubo: $6L^2$ (cm² g⁻¹), donde L es el lado del cubo.

En el suelo, los coloides están representados por las **partículas de tamaño arcilla** y por los **compuestos húmicos**. Son los responsables de la actividad química que se desarrolla en aquel, así como de buena parte de su comportamiento físico.

Los coloides del suelo pueden poseer dos tipos de carga: **Permanente** o **Variable**, mediante la acción de diferentes mecanismos y, según Yu (1997), los componentes del suelo que pueden aportar carga superficial son los minerales silicatados laminares, los óxidos libres y el humus. Los silicatos aportan principalmente carga permanente y negativa, excepto cuando son del tipo de arcillas 1:1; los óxidos de Fe, Al y Mn aportan carga variable, tanto negativa como positiva y el humus aporta carga variable, principalmente negativa.

4.1. LA CARGA PERMANENTE

La carga permanente es aquella carga que está presente siempre en el coloide, sin importar las condiciones del medio en el cual se encuentre, debido a que dicha carga la adquiere durante su proceso de formación.

El mecanismo que interviene en la producción de este tipo de carga es el de la **sustitución isomórfica**, el cual consiste en reemplazar el catión central de las unidades estructurales básicas de los filosilicatos (tetraedros y octaedros) por otros cationes de tamaño similar. La carga se genera cuando la sustitución se hace por un ion que tiene menor carga que el que es reemplazado.

Según Bohn et al (1993), la sustitución isomórfica se presenta entre iones cuya diferencia de tamaño entre los respectivos radios iónicos está entre 10 y 15%. Según Yu (1997), las sustituciones más frecuentes son las de Si^{4+} por Al^{3+} en tetraedros y las de Al^{3+} por Mg^{2+} , Fe^{2+} o por Fe^{3+} , en los octaedros.

Se observa, en el párrafo anterior, que en algunas sustituciones el catión sustituido tiene mayor carga que el catión que lo reemplazó, generándose un remanente de carga en la unidad estructural que fue sometida al proceso de sustitución, como se aclaró antes.

La carga permanente es el tipo de carga que predomina en los silicatos laminares 2:1 y 2:1:1, estando prácticamente ausente en los 1:1 y en los demás coloides del suelo. El tipo de minerales que produce carga permanente es dominante en los suelos de regiones templadas y, en estas regiones son escasos los contenidos de óxidos y de humus por lo que los suelos son de carga permanente. Este tipo de carga es característico de suelos de los órdenes Vertisol, Mollisol y de buena parte de los Alfisoles.

A continuación se ilustra con un ejemplo la producción de carga en un filosilicato mediante el mecanismo de la sustitución isomórfica producida en media celda unitaria de pirofilita (filosilicato 2:1 dioctaédrico), cuya fórmula para media celda unitaria es: $\text{Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$. Si se realiza el balance de cargas del mineral anterior, se tiene:

ION	CARGA UNITARIA DEL ION	CARGA TOTAL POR ION	CARGA TOTAL POR MEDIA CELDA
Al_2	3+	6+	
Si_4	4+	16+	22+ (carga por cationes)
O_{10}	2-	20-	
$(\text{OH})_2$	1-	2-	22- (carga por aniones)
TOTAL			0 (carga neta por media celda)

Se aprecia en el balance anterior que la pirofilita es un mineral que no presenta ningún tipo de carga; si en este mineral se produce una sustitución isomórfica del 25 % del Al por Mg, se obtiene un nuevo mineral que corresponde a la siguiente composición:



Realizando nuevamente el balance de cargas se obtiene lo siguiente:

ION	CARGA UNITARIA DEL ION	CARGA TOTAL POR ION	CARGA TOTAL POR MEDIA CELDA
Al _{1.5}	3+	4.5+	
Mg _{0.5}	2+	1+	
Si ₄	4+	16+	21.5+ (carga por cationes)
O ₁₀	2-	20-	
(OH) ₂	1-	2-	22- (carga por aniones)
TOTAL			0.5- (carga neta por media celda)

El balance anterior muestra como el hecho de sustituir 25 % del Al presente en los octaedros de media celda de pirofilita produce un mineral con 0.5 cargas negativas en esa mitad de celda. De acuerdo con el tamaño y ubicación de la carga acumulada, el mineral resultante corresponde a una montmorillonita, filosilicato de tipo 2:1 del grupo de las esmectitas (ver Figura 1.9).

Aunque existe la posibilidad de que la sustitución isomórfica genere cualquier tipo de carga en los coloides en los cuales se produce, lo más común es que produzca una **carga neta negativa** en ellos.

4.2. LA CARGA VARIABLE

Este tipo de carga corresponde a aquella que se desarrolla en el coloide cuando cambian las condiciones ambientales del medio en el cual se encuentra.

La propiedad que más afecta los coloides del suelo, con respecto a su carga, es el **pH** por lo cual a esta carga variable también se la conoce como **carga dependiente del pH**, pues son los cambios en él los que la generan en mayor proporción.

En este tipo de carga hay también la posibilidad de generar cargas positivas o negativas, dependiendo del valor de pH que haya en el medio (solución del suelo), con respecto a un determinado valor de pH en el cual las partículas sólidas del suelo de carga superficial variable, no tienen carga neta; el valor del pH que produce dicha condición de carga se llama **punto de carga cero: PCC** o, en literatura en inglés, **PZC** (Juo y Adams, 1986; Zhang y Zhao, 1997).

La variación de la carga superficial de coloides de carga superficial variable se estudia mediante titulaciones potenciométricas como una función del pH y de la concentración de electrolitos; al graficar los resultados obtenidos con las titulaciones anteriores se obtienen curvas como las que se representan en la Figura 12.1.

En la Figura 12.1, el valor de pH que corresponde al punto de intersección entre las dos curvas de pH – Carga, se denomina **Punto de cero efecto de sales (PCES)** y, el pH que corresponde con la intersección de las curvas con el eje de cero carga se llama **Punto de carga neta cero (PCNC)**.

En los sistemas donde no hay coloides con carga permanente, no hay efecto de la concentración de los electrolitos y la intersección de las dos curvas pH – carga se produce sobre el eje de carga cero, con lo que se obtiene el PCC (Figura 12.1 b). Cuando en el sistema hay presencia de coloides con carga permanente, positiva o negativa, el punto de intersección se desplaza por encima o por debajo de dicho eje (Figuras 12.1a y 12.1c); en estos casos, Juo y Adams (1986) proponen llamar al PCES como **PCC “aparente”**. Según Zhang y Zhao (1997), entre mayor sea la diferencia entre los valores de PCNC y PCC, mayor cantidad de carga superficial permanente hay en el sistema.

Si el pH del medio se encuentra por encima del PCC, los coloides generarán cargas negativas y, si el pH es menor que el PCC, entonces se producirán cargas positivas en los coloides.

La carga variable es la que predomina en los minerales silicatados de tipo 1:1, en los sesquióxidos de Fe y de Al, en los aluminosilicatos no cristalinos y en los coloides orgánicos. Por lo anterior, es dominante, en general, en los órdenes Oxisol, Ultisol, Andisol y Espodosol; en Colombia también es frecuente en los Inceptisoles.

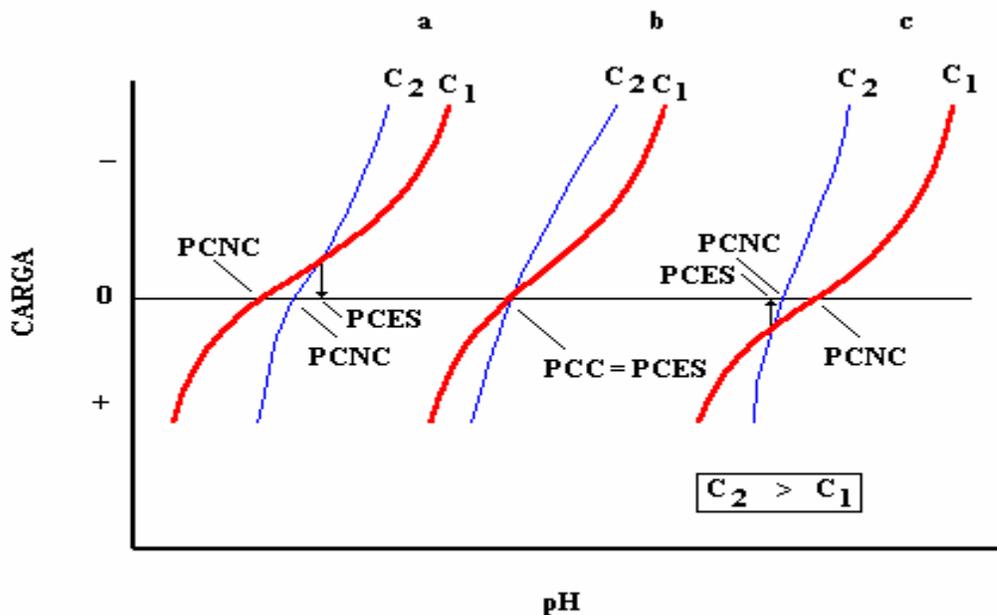


FIGURA 12.1. Representación de diferentes puntos de carga cero en el suelo (C: Concentración del electrolito) (Adaptada de Sposito, citado por Juo y Adams, 1986).

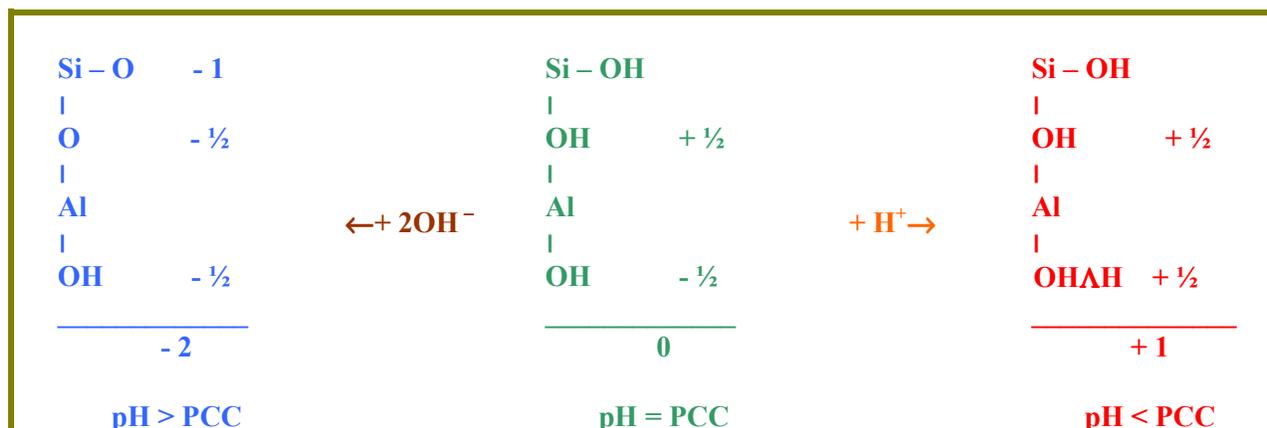
Según Zhang y Zhao (1997), la carga variable puede producirse mediante los siguientes mecanismos:

- En el humus, los grupos carboxilo e hidroxilo representan alrededor de 50% y 30% de los grupos funcionales totales, respectivamente y la carga que produce el humus es predominantemente variable y negativa, debida a la disociación de dichos grupos. Cuando el suelo presenta pH alto se puede presentar un aporte adicional de carga negativa por disociación de grupos amino.
- Las superficies de óxidos y de óxidos hidratados de Fe, Al y Si, los más abundantes en el suelo, poseen grupos hidroxilo unidos directamente al Fe, al Al o al Si, formando los grupos **ferrol** (Fe – OH), **aluminol** (Al – OH) y **silanol** (Si – OH), respectivamente, o pueden estar unidos a moléculas de agua mediante enlaces de hidrógeno. La carga superficial en dichos óxidos e hidróxidos se genera por disociación y pérdida del H⁺ de los grupos hidroxilo: carga negativa, o por combinación de los grupos hidroxilo con iones H⁺ de la solución del suelo: carga positiva.
- El alofano puede generar carga superficial negativa a altos valores de pH, por disociación de iones H⁺ de los grupos silanol, así como carga superficial positiva, a bajo pH, por protonación de grupos aluminol. La ferrihidrita puede producir carga positiva por protonación de los grupos ferrol a pH bajo (Wada, citado por Nanzyo et al, 1993).
- En silicatos laminares tipo 1:1 (arcillas LAC, Capítulo 1), en los bordes y en las superficies externas de las láminas se puede generar carga variable, positiva o negativa. Bajo condiciones ácidas: pH < PCC, los grupos aluminol se protonan generándose una carga positiva por cada grupo. Bajo condiciones alcalinas: pH > PCC, los dos OH unidos al Si se disocian produciendo dos cargas negativas. En la Figura 12.2, se representan los mecanismos de producción de carga variable descritos anteriormente.

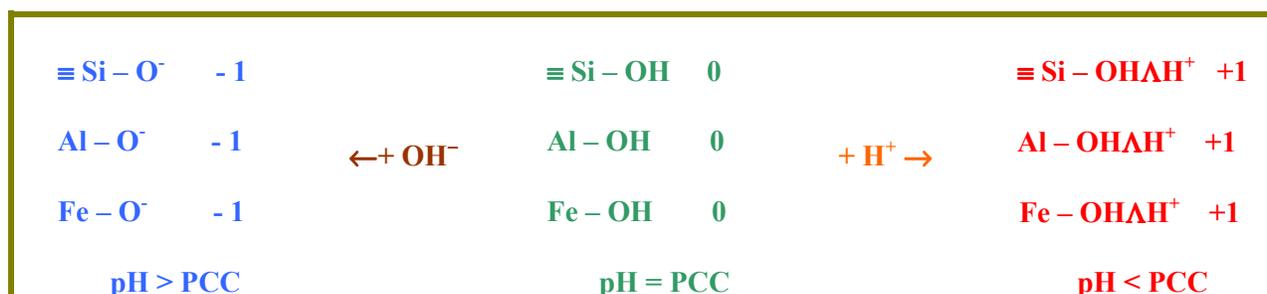
De todos los coloides que generan carga predominantemente variable, los coloides orgánicos son los que producen una mayor cantidad de carga, la cual es netamente negativa; con respecto a los coloides minerales, los aluminosilicatos no cristalinos son los coloides de mayor producción de carga variable, la cual es también netamente negativa; los sesquióxidos de Fe y de Al son los que menos carga variable negativa desarrollan, sobre todo si son cristalinos, pero son los que más carga positiva aportan al suelo, aunque con amplias variaciones en la cantidad debidas a la composición y al grado de cristalinidad que tengan.

Zhang y Zhao (1997) y Juo y Adams (1986) reportan los valores de PCC para algunos coloides inorgánicos comunes del suelo, los cuales se presentan en la Tabla 12.3. Obsérvese como en los sesquióxidos de Fe y de Al es relativamente fácil producir carga positiva, puesto que su PCC tiene valores que se encuentran muy por encima de los valores de pH que se presentan en los suelos donde ellos son dominantes. Caso contrario ocurre con las esmectitas, pues el valor de PCC que tienen prácticamente no se obtiene en suelos minerales y, menos aun, en los que ellas se presentan en altas cantidades.

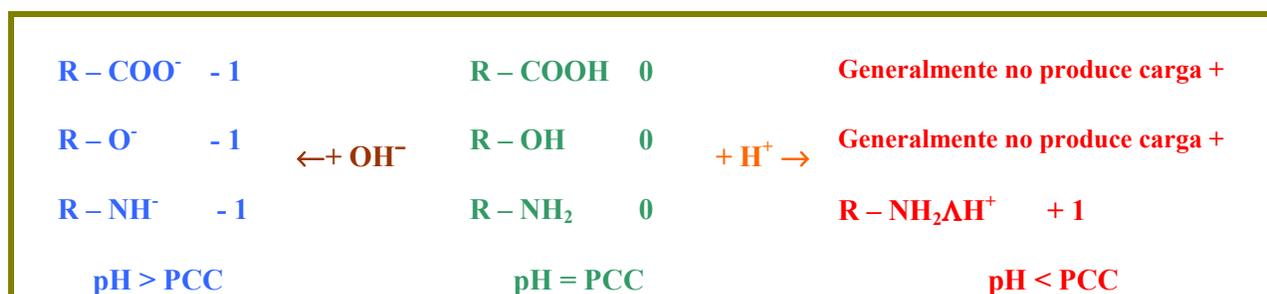
Los suelos con carga predominantemente variable son característicos de las regiones tropicales y de algunas subtropicales. En éstos predominan las canditas entre los filosilicatos y se presentan altas cantidades de óxidos de Fe y de Al, así como de humus, que aportan altas cantidades de carga variable.



a. Generación de carga variable de borde, en sistemas de silicatos laminares tipo 1:1 (Adaptado de Zhang y Zhao, 1997).



b. Generación de carga variable en sesquióxidos (Adaptado de Zhang y Zhao, 1997).



c. Generación de carga variable en compuestos húmicos. **R** representa el resto de la molécula orgánica.

FIGURA 12.2. Representación esquemática de los mecanismos de producción de carga variable en los coloides del suelo.

4.3. IMPORTANCIA DE LA CARGA DE LOS COLOIDES DEL SUELO

En primer lugar, la presencia de cargas electrostáticas en la superficie de las partículas coloidales del suelo hace que éstas traten de neutralizarlas, atrayendo iones con carga contraria a la suya de la solución del suelo; con este mecanismo se evita que dichos iones sean lavados del suelo y, en

el caso de que sean nutrientes para la planta, se le garantiza a ésta un buen abastecimiento nutricional.

Zhang y Zhao (1997) apuntan que las características de la carga superficial de los suelos afectan procesos del mismo como migración de iones, dispersión, floculación, hinchamiento y contracción.

TABLA 12.3. Punto de carga cero de algunos coloides inorgánicos comunes en el suelo, según varios autores citados por Zhang y Zhao (1997) y por Juo y Adams (1986).

COLOIDE	PCC
Gibbsite	9.5
Goetite	8.1
Hematite	7.5
Ferrihidrita	6.9
Alofano	6.5
Caolinita	4.6
TiO ₂	4.5
MnO ₂	4
Esmectita	2.5
SiO ₂	2

Tratando específicamente de los suelos de carga variable, Yu (1997) sostiene que estos suelos tienen la capacidad de retener aniones como nitratos y sulfatos, protegiéndolos contra la lixiviación, cosa que no es posible en los suelos de carga permanente.

Al observar los valores de PCC de los óxidos y de los aluminosilicatos no cristalinos en la Tabla 12.3 se puede apreciar que estos coloides generan principalmente carga positiva en las condiciones comunes de pH de la mayoría de los suelos; este comportamiento se encuentra relacionado con la fijación de algunos aniones como fosfatos, en los suelos en que son predominantes dichos coloides. Nótese también lo difícil que es producir carga positiva en un suelo dominado por arcillas 2:1.

Finalmente, las cargas electrostáticas superficiales presentes en los coloides del suelo no siempre son neutralizadas con iones benéficos para las plantas y/o los otros organismos que viven en o del suelo. Algunas veces son retenidos, por efecto de esas cargas, iones que pueden llegar a ser tóxicos para aquellos organismos como Cu, Pb, Ni, Cd, Co y V, hecho confirmado en suelos de la Sabana de Bogotá por Matamoros et al (1999), o como Se y Mo observados por García et al (1999) en suelos del municipio de Puerto Salgar, Cundinamarca.

RECORDAR

- Un anión es un ion que tiene carga negativa y un catión es un ion que tiene carga positiva.
- Las formas más frecuentes de expresar la concentración de las soluciones, en la ciencia del suelo, son: normalidad, ppm, molaridad y porcentaje.

- En los componentes del suelo se presentan enlaces iónicos, covalentes, de hidrógeno y de van der Waals.
- Los coloides del suelo corresponden a las partículas de tamaño arcilla y pueden ser de composición orgánica (humus) o inorgánica (minerales de arcilla y sesquióxidos de varios metales).
- Las propiedades más importantes de los coloides son: poseer alta superficie específica y tener carga superficial.
- La carga de los coloides del suelo puede ser permanente o variable.
- La carga permanente es principalmente negativa y es característica de filosilicatos tipo 2:1 y 2:1:1; es el tipo de carga dominante en Vertisoles, Mollisoles y muchos Alfisoles.
- La carga variable depende del pH del medio, puede ser negativa o positiva, es característica de filosilicatos tipo 1:1, de sesquióxidos, de aluminosilicatos no cristalinos y del humus y es el tipo de carga dominante en Oxisoles, Ultisoles, Andisoles, Espodosoles y muchos Inceptisoles.

BIBLIOGRAFÍA

- BESOAIN, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. IICA. San José. Costa Rica. 1205 p.
- BOHN, H.L., B.L. McNEAL y G.A. O'CONNOR. 1993. Química del suelo. Limusa. México. 370 p.
- FASSBENDER, H. W. 1982. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. San José. Costa Rica. 398 p.
- GARCÍA, C.; D. CABRERA; L. MEJÍA y A. ROJAS. 1999. Evaluación del contenido de selenio y molibdeno en suelos y pastos de dos fincas ganaderas de Puerto Salgar (Cundinamarca) y de sus posibles efectos en la población pecuaria. Suelos Ecuatoriales 29 (2): 150-154.
- JUO, A. S. R. and F. ADAMS. 1986. Chemistry of LAC soils. **In:** Proceedings of a Symposium on Low Activity Clay (LAC) Soils. SMSS Technical Monograph N° 14. Las Vegas. pp: 37-62.
- KEENAN, CH. W. y J. H. WOOD. 1971. Química general universitaria. Compañía Editorial Continental S. A. México. 951 p.
- MATAMOROS, A.; O. VARGAS y L. MEJÍA. 1999. Especiación química del Pb, Ni, Cr, Cu, Cd, Co y V en dos suelos naturales y en un antrosol agrícolas contaminados por riego con las aguas del río Bogotá en su cuenca alta. Suelos Ecuatoriales 29 (2): 143-149.
- NANZYO, M.; R. DAHLGREN and S. SHOJI. 1993. Chemical characteristics of volcanic ash soils. **In:** Volcanic ash soils: Genesis, Properties and Utilization. Developments in Soil Science 21. Elsevier. Amsterdam. pp . 145-187.
- RESTREPO, J. 2001. Fundamentos de química general. 1ª Ed. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 200 p.
- YU, T. R. 1997. Introduction. **In:** Chemistry of Variable Charge Soils. Yu T. R. editor. Oxford University Press Inc. New York. pp: 3-16.

ZHANG, X. N. y 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. Enumere 5 aniones y 5 cationes del suelo.
2. ¿Cuál es la diferencia entre elemento y molécula?
3. ¿Qué es una solución?. ¿Cuál es su principal característica y qué implica ella?
4. Definir molaridad, normalidad y partes por millón.
5. ¿Cuándo una solución normal y una molar, de los mismos solutos y solventes, tienen iguales cantidades de soluto en un determinado volumen de solución?
6. ¿De qué depende la cantidad de moléculas de hidratación que pueda tener un ión?
7. Definir los tres tipos de enlace químico descritos.
8. ¿Qué es un coloide y cuáles son sus propiedades más importantes?
9. ¿Qué es la sustitución isomórfica y cuál es su importancia en los coloides del suelo?
10. ¿Qué es el punto de carga cero?
11. ¿Cómo se relaciona el pH del medio con la formación de carga positiva en los coloides del suelo?
12. ¿Cuáles coloides del suelo presentan carga permanente y cuáles carga variable?
13. ¿Qué mecanismos producen carga variable en los coloides del suelo?
14. ¿Cuál grupo de coloides del suelo es el que produce mayor cantidad de carga variable?

EVALUACIÓN

1. ¿Cuál es el peso molecular del ácido sulfúrico?. (R: 98 g).
2. Una solución acuosa contiene 4 g de H_2SO_4 en 200 mL. ¿Cuál es la molaridad y la normalidad de dicha solución? (R: 0.2 M, 0.41 N).
3. ¿Cuál es la molaridad de una solución 0.15 N de H_3PO_4 y la de una solución 0.15 N de H_2PO_4^- ? (R: 0.05 M, 0.075 M, respectivamente).
4. ¿Cuántos mL de etanol comercial se deben utilizar para preparar 500 mL de una solución de etanol 5 M?. (R: 145.5696 mL).
5. De una solución 10 M de etanol, ¿cuántos mL se deben tomar para preparar 300 mL de una nueva solución de etanol 6 M?. (R: 180 mL).
6. ¿Cuántos gramos de urea se deben pesar para preparar 600 L de una solución al 4 % de N?. (R: 51428.6 g).
7. En los primeros 20 cm de un Andisol, ¿cuántos kg ha^{-1} hay de P si el análisis de laboratorio reporta un contenido de 16 ppm de P_2O_5 ?. (R: 11.1714 kg).
8. Un Andisol se caracteriza por una muy alta capacidad de fijar el fósforo, a tal punto que para un cultivo retirar 10 a 15 kg de este nutriente, se requieren fertilizaciones hasta de 400 kg ha^{-1} ó más. ¿En cuánto cambia la concentración de P en la solución del suelo, en los primeros 20 cm, cuando se aplican 400 kg de ácido fosfórico (H_3PO_4), si el poder de fijación de fósforo del mismo es del 95 %?. (R: Se incrementa en 3.9514 ppm).
9. Calcular el incremento en superficie específica que se produce al fraccionar una partícula de arena, de forma cúbica, con 2 mm de lado, hasta llevarla a partículas de tamaño arcilla, también cúbicas, con 2 μm de lado. (R: $23\,976 \text{ mm}^2$). Realizar el mismo cálculo pero tomando las partículas esféricas, con diámetro de 2 mm y 2 μm para la arena y la arcilla, respectivamente. (R: $12\,553.4336 \text{ mm}^2$).