

## FUNDAMENTOS PARA LA BUSQUEDA, EVALUACION Y CALIBRACION DE NUEVAS METODOLOGIAS ANALITICAS PARA SUELOS EN EL TROPICO

Alvaro García O.<sup>1</sup>

### 1. INTRODUCCION

El estado nutricional de un suelo se puede evaluar mediante varias técnicas entre las que se pueden mencionar: a) Pruebas biológicas; b) Ensayos de campo; c) Experimentos en invernadero; d) Síntomas de deficiencia; e) Análisis de tejidos; d) Análisis rápido o semicuantitativo de tejidos o de savia; e) Análisis de organelos en las estructuras de la planta; g) Análisis de enzimas o componentes metabólicos; h) del suelo rizosférico y g) Análisis de suelos de rutina. Cada uno de ellos tiene ventajas y limitaciones, algunos son muy especializados y costosos y, otros, requieren mayor desarrollo para ponerlos al alcance del agricultor.

El análisis de suelos es una de las herramientas más eficaces con que se cuenta para conocer en forma “rápida, sencilla y económica” el estado de fertilidad de sus suelos, los problemas que los afectan y determinar la cantidad y tipo de fertilizantes y enmiendas que se requieren. Hoy se usa en forma eficiente para evaluar los efectos del uso continuado o excesivo de fertilizantes sobre suelos y aguas superficiales y profundas.

### 2. LOS PRINCIPIOS DEL ANALISIS DE SUELOS

El análisis como herramienta tiene varios componentes: a) Muestreo adecuado; b) Fase Analítica; c) Investigación sobre correlación y calibración; d) Interpretación y recomendación; e) Educación y transferencia. Ya, en 1973 Welch y Wiese indicaban que “el futuro del servicio de Análisis de Suelos depende del grado en el cual las anteriores componentes se puedan combinar dentro de un programa integral que satisfaga las necesidades del hoy eficiente productor agrícola”. Esta visión adquiere más sentido hoy cuando la sostenibilidad del recurso suelo es el paradigma más importante para garantizar el futuro de la humanidad.

Es bien sabido que la etapa más decisiva es el correcto muestreo con una representatividad adecuada de las muestras. Los suelos se caracterizan por una gran variabilidad y el muestreo se debe hacer considerando la naturaleza y tipo de las variaciones que se presentan algunas de las cuales son consecuencia de causas naturales y otras de la actividad humana, por lo cual los suelos se deben subdividir, tanto horizontal como verticalmente, tratando de conseguir tanta homogeneidad como sea posible, siendo la intensidad del muestreo función de la magnitud de las variaciones de modo que a mayor heterogeneidad mayor número de submuestras.

Por correlación se entiende el proceso de verificación del grado de relación existente entre el nutriente extraído por una determinada solución extractora y la absorción del mismo por la planta en invernadero o campo.

---

<sup>1</sup> Ingeniero Agrónomo, M.Sc., PH.D. Asesorías y Consultorías. E-mail: [agarcia58@yahoo.es](mailto:agarcia58@yahoo.es)

La calibración en campo es fundamental y sin ella no es posible confiar en los resultados y mucho menos en las recomendaciones. Hace referencia a la relación que debe existir entre los valores obtenidos en el laboratorio y la producción resultante como consecuencia de la aplicación de dosis crecientes de un nutriente en el campo. La mayoría de las veces se recurre al análisis de correlación con un número insuficiente de datos simples, algunas otras a la regresión múltiple para incorporar al análisis los componentes del rendimiento.

Múltiples investigaciones han demostrado la influencia de la naturaleza y propiedades del suelo en estudio tales como paisaje, relieve, material parental, composición mineralógica, contenido de materia orgánica, reacción, condiciones de óxido reducción, relaciones iónicas, desbalances nutricionales, textura, estructura, fertilizantes aplicados, especie y aun variedad, tanto en la selección del método de análisis como en la calibración por lo cual se recomienda el uso del análisis multivariado.

Anteriormente se decía que “el éxito de un programa de Análisis de Suelos era directamente proporcional a la investigación acumulada”, sin desconocer lo anterior hoy se debería decir que el éxito también es función del conocimiento que se tenga del suelo o suelos bajo estudio.

Melsted y Peck (1973) indicaron que el bagaje de conocimiento acumulado debe incluir entre otras cosas, las formas químicas más significativas de los nutrientes disponibles en los suelos de la región, los extractantes más aconsejables para medir precisamente las formas disponibles de los nutrientes, la capacidad productiva de los suelos para diferentes cultivos, la respuesta diferencial de las varias ratas y métodos de fertilización para diferentes cultivos, las técnicas de muestreo en campo, metodologías, etc. Esto es, precisamente, uno de los aspectos que demandan y justifican más investigación dada la naturaleza de los suelos tropicales y el poco conocimiento que tenemos de muchos de sus procesos, situación unas veces originada en la adopción de metodologías con muy poca investigación ya sea por carencia de recursos o por considerar que existe suficiente evidencia de sus bondades en la literatura.

La fase de análisis de laboratorio se realiza para determinar el nivel de disponibilidad de los nutrientes esenciales, o sea de la o las formas presentes cuyas variaciones en cantidad se reflejan en variaciones en el crecimiento y rendimiento de las plantas. Se considera universalmente que una metodología analítica debe ser rápida, precisa y económica que debe reunir una metodología analítica. A continuación se discuten los fundamentos que hacen necesaria la búsqueda e implementación permanente de nuevas metodologías Analíticas.

### **3. EL DESARROLLO TECNOLÓGICO**

La sostenibilidad de la agricultura actual depende de que se logre el equilibrio entre la necesidad de obtener una elevada productividad al tiempo que se logra mantener la capacidad productiva de los suelos y se impacta al mínimo el ambiente con químicos y agrotóxicos. Para lograrlo es necesario adelantar mucha investigación para determinar el efecto de dichos productos en la calidad de suelos, aguas y cultivos, su persistencia en ellos y su destino final. Es necesario desarrollar metodologías para caracterizar adecuadamente los suelos y su ambiente químico, la naturaleza de las arcillas, procesos que les dieron origen y que causan cambios permanente u ocasionalmente, composición elemental, reactividad, especiación iónica, etc.

En los últimos 50 años se han desarrollado una gran variedad de técnicas espectroscópicas, microscópicas y analíticas para investigar los suelos y sus reactividad, las cuales proporcionan información detallada sobre los constituyentes del suelo y su estado químico. Desafortunadamente, una sola técnica no es la panacea para investigar sistemas tan complejos y heterogéneos, por lo cual se debe recurrir a varias para obtener una completa y precisa idea de la composición del ambiente químico (Fendorf y Sparks, 1996). A continuación se describen las principales.

Según Wright y Stuczynski (1996) el uso de métodos analíticos espectroquímicos para determinar el contenido de nutrientes en digestados de suelos y plantas y en extractos de saturación ha sido de uso corriente por muchos años. La fotometría de llama se usó con éxito para la determinación de Ca, Mg, K y Na por mucho tiempo hasta que la espectroscopia de llama por absorción atómica, basada en la energía absorbida o emitida durante transiciones entre niveles electrónicos de energía de un átomo, facilitó la determinación de microelementos y elementos no esenciales que pueden afectar el crecimiento y salud de los animales y, más recientemente, para estudios de tipo ambiental, alimentos limpios y salud humana. En los últimos 20 años la introducción y desarrollo de estufas de absorción atómica con implementos variados como torretas para lámparas múltiples y autoanalizadores aumentó las posibilidades analíticas enormemente.

Entre las técnicas analíticas de espectroscopía atómica de uso común se tienen: Absorción Atómica, Emisión de llama Atómica (FAA), Horno de grafito de Absorción Atómica (GFAA) y Fluorescencia Atómica. Hoy muchos de los métodos analíticos basados en emisión atómica usan plasma de Ar inducido por radio frecuencia conocida como Espectrometría de Emisión Atómica de Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-AES). También se considera la Espectrometría de Masa- Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-MS), instrumentación que ofrece muy amplia cobertura elemental y límites de detección excelentes pero que aún tiene algunos problemas que requieren investigación.

El Análisis de Activación de Neutrones (NAA) utiliza las propiedades del núcleo atómico y la activación de este mediante la captura de neutrones y es altamente sensible para la determinación de más de 30 elementos en suelos.

El Análisis Elemental por Espectroscopia Fluorescente de Rayos X (XRFS), evalúa la presencia y concentración en suelos y tejidos vegetales de más de 80 elementos con número atómico mayor de 8 midiendo la radiación secundaria característica emitida por una muestra, que no requiere mucha preparación, excitada por una fuente de Rayos X.

La Cromatografía Líquida o proceso de separación de iones y compuestos por una variedad de matrices en un gran número de columna. Comprende la Cromatografía Líquida de Alta Definición (HPLC) y la Cromatografía Iónica, que ha tenido grandes avances recientes que permiten la determinación a gran velocidad y el monitoreo continuo.

La Voltametría de Pulsos Diferenciales, es una tecnología disponible para el análisis de soluciones de suelo, extractos de suelos, digestados de suelos y soluciones nutritivas. Se basa en la aplicación de potenciales variables a un electrodo indicador en relación con el de referencia, lo cual resulta en una corriente que se mide al potencial para reducción u

oxidación del analizado. Esta técnica tiene muchas variantes que la hacen aplicable a muchas situaciones.

La Polarografía se refiere a la voltimetría que involucra un electrodo de gota de mercurio (DME) la cual tiene muchas ventajas sobre los electrodos estacionarios ya que no acumula productos sólidos de modo que las variables importantes son el potencial del electrodo, la composición de la solución y la corriente..

El Espectrómetro de transformación Infrarroja de Fourier (FTIR) se basa en la espectroscopía vibracional que permite identificar las bandas vibracionales características de todo sólido o líquido encontrado en el suelo y que se convierten en indicadores diagnósticos.

La Espectroscopia de Raman se basa en escaneo luminoso que permite una amplia discriminación espacial en lo que se diferencia de la absorción Infrarroja. Permite obtener información molecular y las interacciones de un compuesto dado.

La Electrón Spin Espectroscopia de Resonancia (ESR) también llamada espectroscopia de Resonancia de electrones Paramagnética (EPR), técnica aplicable al estudio de especies químicas que tienen uno o más electrones no apareados, que incluyen radicales orgánicos libres (como los componentes de sustancias húmicas), radicales iónicos, iones metálicos transicionales y se puede usar para determinar el ambiente químico de una especie o especies.

La Espectroscopia de Fotoelectrones de Rayos X, técnica analítica sensitiva superficial que incluyen Espectroscopia de Auger (AES), Espectroscopia de selección de iones (ISS), Difracción de electrones de baja energía (LEED), Espectroscopia de masa de iones secundarios (SIMS), Espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS), microscopio (SPM), de las cuales XPS es la más popular en estudios de suelos y geoquímica porque proporciona información elemental, del estado químico y semicuantitativa composicional.

La XPS permite determinar los constituyentes del suelo como arcillas, óxidos de Fe, Al y Mn, carbonatos, etc., la composición elemental de superficies, la ocupación de los puntos de carga, reacciones químicas de oxidación y reducción, meteorización química, adsorción de cationes y aniones, enlazamiento químico, reactividad superficial y diferenciación de componentes arcillosos intercambiables y no intercambiables.

La Espectroscopía de Estructura Fina por Absorción de Rayos X que puede proporcionar información sobre la química local y la estructura de un elemento presente en una muestra. También se puede usar para determinar el estado de oxidación, el tipo de vecinos cercanos, el número de coordinación, longitud de los enlaces y simetrías orbitales de un elemento que absorbe rayos X. Esta técnica en combinación con otras técnicas microscópicas y estereoscópicas se constituye en una herramienta única para detallar las propiedades de un suelo y estudiar las reacciones que se suceden en él.

Es lógico pensar que si se dispone de instrumentos para análisis mejores y más precisos se deban desarrollar procedimientos de extracción más simples, menos destructivos, más representativos y más precisos.

### 4. LA NECESIDAD DE EXPLICAR RESULTADOS CUESTIONABLES

Quienes realizan análisis de rutina y quienes lo hacen en procesos de investigación encuentran permanentemente resultados que fácilmente se pueden atribuir a errores, fallas en los equipos o pérdida de cualidades de los reactivos de laboratorio; sin embargo, muchas veces esos resultados son consecuencia de procesos físico-químicos que suceden en el suelo, o son determinados por el ambiente iónico, el material parental, o por efectos del clima o aún de la actividad microbiana o del manejo.

La selección del método analítico generalmente depende de la disponibilidad instrumental. El método usado para preparar la muestra también se debe considerar cuando se selecciona la técnica analítica. Los extractos de suelos son más convenientes para las técnicas ópticas, espectroscopia de masa-plasma inductivamente acoplado o cromatografía iónica porque requieren muestras líquidas. Las muestras sólidas se analizan mediante análisis de activación de neutrones o fluorescencia de Rayos X porque no requieren que las muestras se disuelvan.

A continuación se presentan algunos de las causas de resultados cuestionables para algunos de los elementos que participan en la nutrición de las plantas.

#### 4.1. Fósforo

El P existe en el suelo en formas orgánicas e inorgánicas. El P orgánico puede provenir de residuos de plantas y de flora y fauna del suelo resistentes a una hidrólisis rápida. En esta fracción se pueden identificar fosfatos de inositol, fosfolípidos, ácidos nucleicos y sus derivados y polifosfatos; muchos otros componentes permanecen sin caracterización hoy en día. Técnicas cromatográficas y resonancia magnética se han utilizado para cuantificar varias fracciones orgánicas del P. Esa cuantificación es necesaria para entender los cambios mineralización-inmovilización del P en diferentes ambientes y sistemas de cultivos en suelos.

Varias reacciones físico-químicas y biológicas en suelos y sedimentos regulan la solubilidad del P, lo que a su turno tiene efectos agronómicos y de eutroficación de aguas. Para entender el estado del P inorgánico en el suelo y su disponibilidad se han desarrollado diversos esquemas de fraccionamiento. Las fracciones de P se han usado para estudiar las transformaciones del P aplicado como fertilizante en suelos y para interpretar los valores de P dados por los análisis de laboratorio. Chang y Jackson (1957) diseñaron un fraccionamiento para separar las fracciones Ca-P, Al-P y Fe-P el cual ha sido modificado para considerar los efectos del tipo de suelo.

Cuando la concentración de P en la solución del suelo (factor Intensidad de P) disminuye por remoción es renovada por P lábil el cual a su turno es renovado muy lentamente por P no lábil. La cantidad de P lábil, la concentración de P en la solución y la capacidad amortiguadora de P que gobierna la distribución de P entre la solución y las fases sólidas, son los factores primarios que caracterizan la disponibilidad de P.

La función básica de los tests de P es determinar los factores cantidad e intensidad del P en el suelo. Los niveles de P analíticos dependen de los métodos y de las características del suelo. En muchos casos, los niveles de P están definidos operacionalmente a menos que la capacidad amortiguadora del suelo sea considerada en la interpretación de los resultados analíticos (Kuo,

1991,1996). Este último aspecto es el problema de fondo en el desarrollo analítico y requiere investigación en suelos tropicales.

A través de los años se ha desarrollado una amplia variación de métodos que reflejan principalmente preferencias regionales, consideración de los tipos de suelos y eficiencia de operación. Los métodos nuevos que incluyen quelatos (EDTA y DTPA) están diseñados para evaluar, además del P, otros aniones y cationes. El desarrollo reciente del método del papel de filtro impregnado con óxido de Fe, que remueve P de la misma manera que lo hace la resina aniónica, puede eliminar el proceso tedioso de separar la resina del suelo que lo hace poco práctico (Kuo, 1996).

El P en extractos de suelo o en tejidos se puede determinar por instrumentación (ICP o IC) o por química húmeda por diferentes métodos colorimétricos.

### 4.2. Metales alcalinos (Potasio y Sodio)

La selección de los procedimientos más adecuados entre los muchos disponibles para evaluar el estado de este nutriente requiere un conocimiento básico de la química del K en el suelo y una definición de las varias formas

El potasio en el suelo se encuentra distribuido en diferentes formas, sin que exista un límite riguroso entre una forma y otra. Estas formas presentan diversas denominaciones según varios criterios. Así, Lui, Laird y Barak (1997) dividen el  $K^+$  del suelo en soluble, intercambiable y no intercambiable, el cual a su vez dividen en  $K^+$  recientemente fijado (potasio que se fija después de una adición de  $K^+$ ) y  $K^+$  fijado nativo ( $K^+$  estructural). Estas tres formas de  $K^+$  dan una representación general de la disponibilidad del mismo en el suelo.

El  $K^+$  soluble en agua es inmediatamente disponible a las plantas y el  $K^+$  intercambiable fácilmente disponible, pero el  $K^+$  no intercambiable (que generalmente constituye la mayor proporción del  $K^+$  total del suelo) puede llegar a ser disponible sólo muy lentamente a través de meteorización (Sharpley, 1990). El K no intercambiable comprende el  $K^+$  estructural o nativo y el  $K^+$  fijado entre las láminas de arcillas 2:1. (Jungk y Claassen, 1997), consideran que el  $K^+$  no intercambiable del suelo es moderada a escasamente disponible para las plantas, dependiendo de varios parámetros del suelo.

El  $K^+$  estructural se define como la fracción del elemento contenido en la estructura cristalina de minerales primarios y secundarios (Nachtigall y Vahl, 1989), el cual se libera gradualmente a medida que los procesos de alteración química tienen lugar. Además, las raíces pueden alterar irreversiblemente y aún destruir ciertos minerales arcillosos (Jungk y Claassen, 1997).

El  $K^+$  total corresponde a la sumatoria de  $K^+$  extractable ( $K^+$  soluble más  $K^+$  intercambiable) y el  $K^+$  no intercambiable ( $K^+$  fijado más  $K^+$  estructural). Su contenido en el suelo es proporcional al tipo y cantidad de minerales presentes en el suelo. Así, por ejemplo, suelos ricos en micas como la muscovita y la biotita, o feldespatos potásicos son los que presentan los mayores contenidos de  $K^+$  total. El  $K^+$  total es poco útil para diagnosticar los requerimientos de fertilización potásica.



Las interacciones del potasio con otros iones reflejan cambios en la disponibilidad de nutrientes para las plantas y/o alteraciones en la función de iones en el desarrollo fisiológico de las mismas (Usherwood, 1978). En el suelo son numerosas las especies químicas que se encuentran presentes, sin embargo, no todas interactúan de una manera directa con el potasio. Debido a que el tamaño del ión  $K^+$  es similar al del ión  $NH_4^+$ , los dos iones pueden competir por sitios de intercambio de superficie o sitios de fijación (Lumbanraja y Evangelou, 1994).

Varios factores influyen sobre la fijación y liberación de K en el suelo entre los que se incluyen el tipo y la cantidad de minerales, el relieve, el grado de mineralización de los mismos, factores ambientales como temperatura y los cambios día-noche, precipitación y los ciclos de humedecimiento y secado, la actividad biológica y la concentración de agentes orgánicos complejantes, el pH, el potencial redox en el suelo y en la rizosfera, el ambiente iónico y los niveles de K en la fase soluble, otras fracciones de K en el suelo ( Rich, 1972; Sparks y Huang, 1985; Goulding, 1987, Sparks, 1987, Helmke y Sparks, 1987, Borrero y García, 2006). Según Helmke y Sparks (1996) de esos factores, la mineralogía del suelo y la mineralogía del suelo y el nivel de K en la solución del suelo son los que más influyen en la fijación o liberación de K.

El sodio no es un elemento esencial para las plantas pero sí benéfico para muchas como la remolacha azucarera y la caña de azúcar entre otras. No existe un método estándar para evaluar la disponibilidad de este elemento para las plantas (Helmke y Sparks, 1996). Generalmente se evalúa, en el suelo o en el extracto de saturación, en términos de exceso y/o toxicidad para las plantas y para determinar las prácticas de manejo a seguir en el caso de suelos sódicos. Sus efectos e interacciones en el ambiente físico-químico del suelo raramente se tienen en cuenta.

La determinación de K y Na intercambiables más popular es la extracción con una sal neutra, generalmente  $NH_4OAc$  1M con una corrección por el elemento soluble. Se debe anotar que el K soluble es mínimo en suelos normales y se puede ignorar pero en suelos salinos su concentración es considerable; en el caso del Na sucede lo mismo pero se debe tener en cuenta que en suelos de regiones secas su concentración puede variar de considerable a muy elevada, por lo que la corrección es importante.

En suelos que contienen vermiculita meteorizada y minerales micáceos se puede presentar K no accesible para Ca o Mg en algunas zonas de caña, pero si es extractable por  $NH_4$ , que tiene un tamaño similar al K, lo que puede resultar en una sobreestimación del K intercambiable por lo cual se indica que este no es un método confiable para determinar el suplemento de K en este tipo de suelos (Helme y Sparks, 1996; Borrero y García, 2006; Dobermann y Fairhust, 2000).

### 4.3. Metales alcalino-térreos

Calcio, Mg, Sr y Ba tienen radio iónico pequeño y alta relación Carga/Radio; Mg y Be pueden precipitar como hidróxidos en soluciones acuosas. Calcio, Sr y Ba tienen una estrecha afinidad, con un cambio sistemático en sus propiedades a medida que incrementa el tamaño del ión. Estas incluyen solubilidad creciente de las sales sulfato, cloruro y nitrato, creciente hidratación de las sales cristalinas y decreciente energía de ionización; además, forman precipitados relativamente insolubles con carbonatos y sulfatos. Los sulfatos de Mg son

solubles y el carbonato no precipita hasta que el Mg en solución es mucho mayor que el Ca (Suarez (1996)); esto último explica la dominancia del Mg a pesar de la existencia de altos niveles de Ca extractable en buena parte de los suelos del Valle del Río Cauca clasificados como magnésicos.

No se recomienda el uso del Ba como catión extractante para el análisis de cationes intercambiables para suelos en donde el carbonato de calcio o el yeso (alcalinos, calcáreos, yesíferos o recién encalados) estén presentes debido a la insolubilidad de sus sales.

Los elementos alcalino-térreos están presentes en el suelo fracciones clasificadas como soluble, orgánicamente ligada, intercambiable, como carbonatos, distintas fases de silicatos y sulfatos. Mientras que la fracción silicato es la de mayor tamaño y proporciona una fuente de largo término de cationes solubles y no afecta los cambios estacionales de corto término en las demás fracciones (Suarez, 1996).

La fracción soluble, importante en el pasado solo en el caso de los suelos salinos, recientemente ha recibido creciente atención como componente de la disponibilidad de nutrientes para las plantas y como fracción activa físico-químicamente. El estudio de la química de la solución requiere una evaluación de su composición independiente de los cationes intercambiables. Adicionalmente, los suelos salinos contienen cantidades apreciables cantidades de Ca y Mg en solución, que requieren una caracterización independiente de la fase intercambiable.

El análisis de los iones solución se hace a través de un extracto de saturación que proporciona un estado de referencia para comparar diferentes muestras, pero que no representa la composición de la solución del suelo en condiciones de campo, en las cuales el contenido de agua es menor y la presión parcial de CO<sub>2</sub> es mucho mayor. Los métodos alternativos incluyen el uso de lisímetros a cero tensión, extractores de vacío, centrifugación y técnicas de desplazamiento no miscible cuyo uso depende del interés particular: examinar la composición promedio o la de la solución en los macroporos para propósitos de estudiar el transporte de solutos (Suarez, 1996).

Según el mismo autor, el uso del intercambio iónico para cuantificar los cationes intercambiables asume que la adsorción de los mismos de la solución es un proceso reversible. La reacción de intercambio típicamente se conduce bajo condiciones amortiguadas o a pH constante. Esto sirve para proporcionar una base de referencia para comparación entre suelos pero puede resultar en extracciones que son diferentes de aquellas realizadas al pH del suelo en condiciones de campo.

El intercambio se lleva a cabo por reacciones múltiples con una solución de un ión que es preferencialmente adsorbido en los sitios de cambio. Este proceso está diseñado para asegurar que los cationes intercambiables sean completamente desplazados por la solución. Estos métodos estandarizados de intercambio son útiles para comparar suelos pero no siempre representan los cationes intercambiables como existen en condiciones de campo. Esto podría requerir el equiparar el pH y la fuerza iónica de las muestras con un catión intercambiable de propiedades químicas similares, lo que implica mucho tiempo de trabajo y que el criterio deseado puede no ser óptimo para suelos alcalinos.



Calcio y Mg se pueden extraer por medio de soluciones concentradas de Ba, pero este método no es adecuado para suelos de regiones áridas ricos en carbonatos debido a la formación de precipitados insolubles de carbonato de Ba y en una disolución intensa de  $\text{CaCO}_3$  que da como resultado una concentración erróneamente alta de Ca (Suarez, 1996); en forma similar en suelos del Valle del Río Cauca en los cuales el  $\text{SO}_4$  es el anión dominante se forma un precipitado insoluble de  $\text{BaSO}_4$ . Suarez 1996) indica que el uso de NaOAc a pH 8.1, o método de Bower (1952), u otros buffers no es satisfactorio porque causa disolución o precipitación, problema que hasta el presente no tiene una solución fácil. Más que intentar prevenir la disolución o la precipitación la corrección por sulfatos y alcalinidad en la solución extractora (Amrhein y Suarez, 1990) puede ser deseable para suelos calcáreos o yesíferos.

En algunos casos  $\text{NH}_4^+$  puede extraer más o menos cationes de los que ocupan las posiciones de cambio. En suelos calcáreos este extractante puede disolver carbonato de Ca como sucede en los suelos del valle del río Cauca (García, 1985, González y García, 2002; Valenzuela y García, 2001 y Borrero y García, 2006).

En suelos con altos contenidos de micas y vermiculita, como algunos del valle del río Cauca, el  $\text{NH}_4\text{OAc}$  no extrae todos los cationes. Además, Fisher (1963) determinó mayores concentraciones de Mg intercambiable usando  $\text{NH}_4\text{OAc}$  que por un método radioisotópico lo que indica disolución de materiales que lo contienen y García (1986) encontró una fuerte disolución de carbonatos y zeolitas en suelos de California cuando se usó el  $\text{NH}_4\text{OAc}$  como extractante. También el  $\text{NH}_4^+$  se puede intercambiar irreversiblemente con cationes interlaminares que no son considerados iones intercambiables.

Suarez (1996) concluye que aunque puede ser deseable estandarizar una solución uniforme ello no es posible debido a diferencias en las propiedades y ambiente del suelo. Según este autor, en suelos calcáreos un extractante como el NaOAc a pH 8.1 se puede usar como estado de referencia pero no lo es para suelos ácidos particularmente en aquellos de carga variable de considerable importancia. Bajo estas circunstancias se requiere una extracción más realista, como el uso común de  $\text{NH}_4\text{OAc}$  amortiguado a pH 7. para suelos ácidos se puede usar también el  $\text{BaCl}_2$  como extractante, el cual se puede ajustar con HCL o NaOH al pH deseado.

#### **4.4. Micronutrientes**

##### **4.4.1. Boro**

Entre los elementos menores el Boro ocupa un lugar destacado por su deficiencia generalizada en muchas regiones. Esta se presenta de manera general, en regiones húmedas o en suelos arenosos, mientras que la toxicidad se produce con más frecuencia en suelos de las regiones áridas o semiáridas. En Ecuador, por ejemplo, se producen toxicidades en proximidades al volcán Cotopaxi en donde muchas aguas presentan niveles elevados de ese elemento.

Los procesos de sorción y desorción regulan la concentración de B en la solución dependiendo de los cambios en la concentración de B en solución y de la afinidad del suelo por B. De este modo el B adsorbido puede amortiguar las fluctuaciones en la concentración de B en solución, y ésta puede sufrir cambios insignificantes por cambios en el contenido de agua del suelo durante la absorción de agua por las plantas (Keren, 1996). Cuando se planea

irrigar o se dispone de agua para riego alta en B, se debe prestar especial atención a esta interacción debido al estrecho rango entre niveles de deficiencia y toxicidad.

El B puede ser específicamente adsorbido de manera diferencial por diferentes arcillas sobre los bordes y no sobre las superficies planares las cuales se comportan como un ligando, por hidróxidos de Fe y Al por un mecanismo de intercambio de ligandos, por hidróxidos de Mg y por la materia orgánica. Estos procesos son dependientes del pH con un máximo en el rango alcalino. También dependen de la fuerza iónica, de la composición iónica adsorbida y del contenido de humedad

Las características físico-químicas del suelo son importantes para evaluar el B en el agua de irrigación debido a que la absorción de B por las plantas depende solamente de la actividad del B en la solución del suelo. Las plantas sembradas en suelos de bajo contenido de arcilla absorben más B que las sembradas en suelos con alto contenido de arcillas (Keren, 1996). La illita es la más reactiva respecto al B y la caolinita la de menor capacidad de adsorción.

Varias metodologías de extracción calibradas en diversas partes y con disponibilidad de estándares adecuados para interpretar el análisis de suelo están disponibles hoy en día. Entre ellas se encuentran el agua caliente para B soluble, el manitol para B intercambiable, el B extractable por Mechlich III y el fosfato monobásico de calcio y para la determinación se dispone de métodos colorimétricos y potenciométricos y la espectroscopia de plasma inducido.

### **4.4.2. Hierro**

El principal factor que afecta la biodisponibilidad del Fe es la facilidad de disolución de los óxidos que lo contienen, la cual es función del tamaño de partícula y la reactividad de la fase mineral. Los óxidos de hierro predominantes en suelos son hematina, goetita, lepidocrita, magnetita, maghemita y ferrihidrita. De ellos la magnetita, presente en partículas de tamaño de limos y arenas, contiene ambas formas  $Fe^{+3}$  y  $Fe^{+2}$ , en los demás óxidos hay  $Fe^{+3}$  y se encuentran en partículas de tamaño de la fracción arcillosa.

El Fe se puede complejar por los materiales húmicos en función del potencial redox. A  $pH < 5$  se encuentran complejos estables de  $MO-Fe^{+3}$  y a  $pH < 6$ , los complejos  $Fe^{+3}$ -humus pierden importancia debido a hidrólisis de Fe y a precipitación de óxidos de Fe.

En suelos calcáreos con pH alcalino los humatos del suelo no protegen el Fe de la hidrólisis, excepto en microambientes reductivos a bajo pH como en caso de alta actividad microbiana o en la rizósfera, en donde la formación de complejos por la materia orgánica o por solutos orgánicos como ácidos oxálico y cítrico y sus sales puede ser apreciable; también la presencia de sideróforos queladores pueden evitar la hidrólisis del Fe a  $pH > 7.5$ , haciendo que la disponibilidad de Fe en la rizosfera sea mayor.

En la fase soluble el pH, el potencial redox, la concentración de agentes complejantes del Fe soluble en agua, la solubilidad de las fases de Fe en el suelo, la cinética de la disolución y precipitación de las fases controlan la concentración de Fe. La concentración total de Fe en la solución del suelo aumenta a medida que disminuye el potencial redox debido a que incrementan las especies de  $Fe^{+2}$  (Loeppert e Inskeep, 1996).

Lindsay y Schwab (1982) sugirieron que excepto por condiciones de inundación o saturación de los poros del suelo por períodos extensos, el Fe total disuelto en el suelo es insuficiente para satisfacer las necesidades nutricionales inmediatas de muchas especies de plantas. Las plantas y los microorganismos han evolucionado creando mecanismos que incrementan la solubilidad y disponibilidad del Fe en la rizósfera, por exudación de  $H^+$ , ácidos orgánicos y agentes reductores como los sideróforos.

Para determinar la disponibilidad los métodos más ampliamente usados son la extracción con EDTA y DTPA para los elementos Fe, Zn Mn y Cu. Lindsay y Norvell (1978) indican que el último es el más útil. Loeppert e Inskeep (1996) mencionan una modificación al procedimiento de extracción mediante amortiguación del DTPA con  $NH_4HCO_3$  1M a pH 7.6, propuesto por Soltanpour y Schwab (1977) para extraer Fe, Mn, Zn, Cu,  $NO_3^-$ ,  $K^+$  y fosfato.

El Fe-DTPA ha correlacionado bien con la incidencia de clorosis férrica en plantas del grupo denominado Estrategia II (liberación de fitosideróforos y subsecuente movilización y toma de Fe) en las cuales la fortaleza del DTPA radica en la habilidad para extraer las mismas formas lábiles que la planta. El DTPA ha sido menos exitoso con plantas del tipo Estrategia I (mecanismo de respuesta al estrés causado por deficiencia de Fe mediante acidificación de la rizosfera e incremento de la actividad de la  $Fe^{+3}$ - reductasa de la membrana plasmática de la raíz (Marschner, 1986). Sin embargo, en suelos húmedos o pobremente drenados, el DTPA tiene limitaciones para determinar la disponibilidad de Fe para las plantas debido a la influencia de la aireación y respiración radicular en la movilización y absorción de Fe. También se deben tener en cuenta otros factores como reactividad de los carbonatos del suelo, y factores ambientales como agua del suelo, aireación y compactación y tolerancia varietal (Loeppert e Inskeep, 1996).

### **4.4.3. Manganeso**

El Mn se encuentra en el suelo en forma soluble, intercambiable, específicamente adsorbido o retenido, adsorbido o complejado por la materia orgánica, como precipitados insolubles y como constituyente de minerales. Las dos primeras fracciones son las más disponibles para las plantas; la primera es la más móvil.

Su disponibilidad depende más del pH que de cualquier otro factor, aunque los niveles de materia orgánica y la aireación del suelo ejercen alguna influencia sobre ella. Los medios ácidos y las condiciones de reducción favorecen las formas divalentes que resultan en aumento de las formas soluble e intercambiable al punto de llegar a ser tóxico. Donde el Mn es tóxico la aireación y el incremento del pH favorecen la formación y estabilización de óxidos de Mn poco solubles; las condiciones de oxidación y el enclamiento favorecen la aparición de síntomas de deficiencia.

### **4.4.4 Cobre y Zinc**

Cobre y Zn se encuentran en el suelo en forma libre y formando complejos en la solución del suelo, adsorbidos en forma no específica, adsorbidos en forma específica o intercambiable por carbonatos, materia orgánica hidróxidos de Fe, al y Mn y en los filosilicatos, como iones ocluidos en carbonatos e hidróxidos en el suelo, en residuos biológicos y en organismos vivos y en la estructura cristalina de minerales primarios y secundarios.

Las formas lábiles de Cu y Zn incluyen formas libres y complejadas en la solución del suelo, responsables de la intensidad del suelo para suplementar nutrientes a las plantas y las no específicamente adsorbidas que dan al suelo la capacidad de renovar el suministro de nutrientes a la solución. Las formas no lábiles incluyen aquellas ligadas fuertemente a la superficie del suelo en contacto con la solución como en el caso de de Cu y Zn complejados con MO y en formas que no están en contacto con los solutos del suelo, Cu y Zn ocluidos, y los que hacen parte de materiales biológicos y organismos vivientes en la estructura cristalina de minerales primarios y secundarios. Ambos grupos están siempre en equilibrio metaestable con reversión de una formas a las otras en procesos demasiados lentos como para solucionar las necesidades de suministro de nutrientes a los cultivos durante un ciclo de cosecha.

Las deficiencias de cobre son prevalentes en suelos orgánicos en los cuales el Cu es complejado más fuertemente que el Zn por grupos funcionales de la materia orgánica. El sobre-enalamiento de suelos ácidos causa deficiencia de estos elementos, el pH influencia la disponibilidad a medida que incrementa pues favorece la complejación por la MOS, la adsorción sobre superficies de componentes inorgánicos y oclusión por óxido e hidróxidos del suelo.

#### **4.4.5. Molibdeno**

Molibdeno es esencial para las plantas en las cuales su deficiencia es más común que la toxicidad. Su contenido en el suelo depende del material parental

Y es influenciado por el pH en forma decisiva de modo que por cada unidad de aumento en el pH, por encima de 5 se produce un incremento en la concentración de Mo de 100 veces. A alto pH el Mo parece estar asociado con el Ca y así es disponible para las plantas. Su absorción es estimulada por la presencia de P y en menor extensión por cloruros y nitratos pero es fuertemente deprimida por sulfatos.

Los extractantes más comunes son oxalato de amonio a pH 3.3., agua caliente, resinas de intercambio aniónico y bicarbonato de amonio-DTPA; el primero extrae mucho más que los otros extractantes y no correlaciona bien con la absorción por la planta.

#### **4.4.6. Cobalto**

Los intentos de medir el Co disponible para las plantas ha tenido éxito limitado y no hay un índice de disponibilidad adecuado. Se mencionan entre otros ácido acético-dithizone, ácido acético—EDTA, pirofosfato, hidroxilamina y determinaciones isotópicas de intercambio. La determinación se logra por Absorción Atómica.

### **4.5. Cloruro**

Para la determinación de cloruros se han empleado métodos gravimétricos, volumétricos y electrométricos. Entre los gravimétricos para suelos y plantas los más comunes son la titulación potenciométrica, lectura potenciométrica directa y titulación automática coulométrica-amperométrica.

En extractos de suelos se han usado electrodos de membrana líquida, lectura directa con electrodo de estado sólido, titulación con  $\text{AgNO}_3$  usando un electrodo de estado sólido para

Cl<sup>-</sup> como indicador de punto final y titulación con AgNO<sub>3</sub> usando un electrodo para Ag<sup>+</sup> como indicador de punto final. El uso de cualquiera de estos equipos requiere investigación para determinar cual se adapta mejor a las condiciones tropicales. Así, Frankerberger et al (1996) cita resultados de Magalhaes y Page (comunicación personal) que muestran que se obtienen valores ligeramente más elevados usando un electrodo de estado sólido para lectura directa que cuando se usa el titulador automático coulométrico-amperométrico. Adriano y colaboradores (1973) obtuvieron resultados similares usando el titulador automático y la titulación potenciométrica de extractos de plantas.

Los electrodos para iones específicos se han convertido en una herramienta muy aceptada. Frankenberger et al. (1996) citan como ventajas de su uso al rapidez de la determinación, la medición directa de la actividad iónica lo cual tiene más sentido que la concentración en términos físico-químicos, no causan destrucción de la muestra y el pretratamiento en la mayoría de los casos no es necesario y la sencillez del equipo y su facilidad para portarlo.

El titulador automático tiene muchas ventajas entre las cuales se cuentan la rapidez y sus resultados han probado ser superiores a los obtenidos por medios colorimétricos o electrométricos.

### 4.6. Azufre

Las fracciones del S inorgánico en suelos incluyen sulfato (SO<sub>4</sub><sup>-</sup>), sulfito (SO<sub>3</sub><sup>-</sup>), tiosulfato (S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>-</sup>), sulfuro (S<sup>-</sup>), polisulfuro (S<sub>n</sub><sup>-</sup>) y azufre elemental (S<sup>o</sup>). En suelos bien drenados y aireados predomina el SO<sub>4</sub><sup>-</sup> y bajo condiciones anaeróbicas la forma principal es el S<sup>-</sup> con algo de S<sup>o</sup>.

Poco se sabe acerca de las identidades de los compuestos orgánicos de S en el suelo. No es posible hacer determinación directa del S orgánico total con la metodología existente actualmente. Así mismo, aunque ha sido posible identificar, con cierto grado de certeza, la naturaleza química de las formas de S presentes de los suelos, los métodos actuales no permiten la identificación de la naturaleza química de los compuestos orgánicos de S como el mismo grado de certeza que las fracciones inorgánicas.

### 4.7. Carbono orgánico

El C es el principal elemento presente en la materia orgánica del suelo, variando de 48 a 58% del peso total. Puesto que no existe un método completamente satisfactorio para la determinación del contenido de materia orgánica del suelo, la determinación de C orgánico se utiliza como base para estimarla multiplicando su valor por un factor. Por muchos años el factor de Van Bemmelen de 1.724 se ha usado asumiendo que la materia orgánica contiene 58% de C orgánico. Sin embargo, muchos estudios han demostrado que la proporción de C en la materia orgánica del suelo es altamente variable en un alto número de suelos y no es, por tanto, un factor apropiado para todos los suelos (Nelson y Sommers, 1996).

Muchos estudios han indicado que dicho factor es muy bajo para muchos suelos por lo que consecuentemente se subestima el contenido de materia orgánica. Se han propuesto valores entre 1.9 y 2.5 para la superficie y el subsuelo, respectivamente (Broadbent, 1953). El factor varía no solo entre suelos sino también entre horizontes de un mismo suelo, por lo que es más

apropiado determinar y reportar el C orgánico que convertir dicho valor obtenido analíticamente a contenido de materia orgánica a través del uso de un factor

### 4.8 Nitrógeno

La determinación de N total en suelos y en otros materiales heterogéneos que contengan varias formas de N presenta muchas dificultades. El análisis de suelos se complica por lo inadecuado del conocimiento referente a las formas de N presente y por el bajo contenido de N del material bajo análisis. Dos métodos y sus modificaciones son los preferidos para la determinación: Kjeldahl (1883) que es esencialmente un procedimiento de oxidación húmeda y el de Dumas (1831) que fundamentalmente es una oxidación seca (Bremner, 1996).

Muchos suelos contienen N inorgánico en forma de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), este último en cantidades despreciables. Algunas otras formas propuestas como intermediarios durante las transformaciones microbiológicas incluyen la hidroxilamina, ácido hiponitroso y nitramida los cuales son termodinámicamente inestables por lo que no se han detectado en suelos. El  $\text{NH}_4^+$  se puede encontrar fijado o localizado en las interláminas de algunos minerales arcillosos de tipo 2:1 como vermiculita e illita y la forma intercambiable.

La determinación de las formas inorgánicas de N en el campo es complicada considerablemente por la extensiva variabilidad espacial por lo que se requieren técnicas de muestreo especiales. Adicionalmente, las formas de N inorgánico están sujetas a transformaciones microbiales que producen cambios en el contenido de N inorgánico de las muestras. Numerosas técnicas se emplean para determinarlas muchas de las cuales complican la preparación de extractos los cuales se analizan por colorimetría, potenciometría de iones selectivos, destilación al vapor, microdifusión, cromatografía iónica y espectrofotometría ultravioleta (Mulvaney, 1996).

La mayoría de estudios sobre las formas orgánicas de N en suelos se basan en el uso de ácidos o bases para liberar constituyentes nitrogenados de los coloides orgánicos y arcillas minerales calientes. Los compuestos identificables son amino ácidos y amino azúcares, el N contenido en el residuo se denomina N ácido-insoluble y el recuperado por destilación con  $\text{MgO}$  se denomina  $\text{N-NH}_3$ . El N no contado entre las anteriores formas se conoce como fracción de N desconocido hidrolizables (Stevenson, 1996).

### 4.9. Capacidad de Intercambio Catiónico

Las cargas negativas en las partículas de suelo son neutralizadas por un exceso de cationes y un déficit de aniones (adsorción negativa o repulsión de aniones) sobre los que podrían estar presentes en ausencia de la fase sólida. Esto esencialmente significa que la mayor parte de la carga negativa atrae cationes para neutralización y las restantes repelen aniones, que es equivalente a atraer cationes. Adicionalmente, los suelos contienen sales en la solución del suelo en equilibrio con los sitios de cambio. Durante la determinación de la CIC, esas sales son extraídas con los cationes intercambiables y pueden causar errores.

La CIC de un suelo depende en forma crítica de la manera y condiciones en las cuales es determinada. En consecuencia, la CIC siempre debe ser operacionalmente definida en términos de variables tales como pH, concentración, naturaleza y valencia de los iones y



capacidad de amortiguación de la solución extractora, la naturaleza de la solución para lavar el exceso de solución extractora y la temperatura.

También es necesario tener en cuenta el propósito para el cual se está determinando la CIC. Desde el punto de vista de descripción de procesos en campo en suelos que pueden ser afectados por la CIC, no hay duda que la mejor aproximación es el uso de métodos que consideren el uso de soluciones extractoras no amortiguadas de modo que la CIC es medida al valor del pH del suelo. Los métodos que usan agua/alcohol para remover el exceso de electrolito son aceptables, pero aquellos que controlan y corrigen por la fuerza iónica de solución final de equilibrio dan resultados mas significativos.

Dependiendo del suelo, las fuerzas iónicas de la solución final de equilibrio se deben ajustar par aproximarlas a la de la solución del suelo natural. Para suelos con  $\text{pH} > 7$  o que contienen poco material de carga variable se pueden usar soluciones extractoras amortiguadas con lavado agua/alcohol. En suelos que no contienen cantidades apreciables de sales solubles o  $\text{CaCO}_3$  libre, la CIC puede estimarse como la suma de de las bases intercambiables mas  $\text{Al}^{+3}$ . Si el propósito es comparar los valores de la CIC de suelos como una ayuda para clasificación, se deben hacer las mediciones a un valor de pH estandar. Si esto no se tiene en cuenta, efectos antropogénicos tales como encalado y fertilización pueden hacer que el mismo suelo valores de CIC ampliamente diferentes, particularmente si este contiene cantidades apreciables de cargas variables.

### 4.10. Salinidad

Según Rhoades (1990), en ciertas circunstancias es deseable conocer directamente las concentraciones individuales de los solutos de más importancia en el agua del suelo en condiciones de humedad de campo sin necesidad de tomar muestras para análisis de laboratorio. No existe un método práctico que permita hacerlas en forma detallada, pero si se puede determinar la salinidad total *in situ* usando señales eléctricas con varios tipos de sensores. Este tipo de determinaciones son suficientes para propósitos de diagnóstico, estudios de suelos, para monitoreo de la salinidad y para evaluar la eficiencia del lavado y el drenaje.

La concentración de sales solubles de un agua se puede determinar por medición de su conductividad eléctrica o de los residuos que quedan por evaporación (total de sólidos disueltos) que es un método muy apropiado para muchos propósitos. En un suelo se puede medir en el extracto de saturación o desplazando la solución del suelo, también se puede medir *in situ* usando sensores de conductividad eléctrica porosos enterrados que se imbiben con el agua del suelo o por medio de mediciones de electrodos o del electrodo cuádruple; también se puede hacer remotamente usando sistemas electromagnéticos muy adecuados para el monitoreo a medida que el suelo se seca entre riegos como el TDR (Time Domain Reflectometry).

Para la determinación de la concentración de un soluto en particular se requiere coleccionar la solución del suelo o tomar muestras para análisis de laboratorio. La primera se pueden obtener por medio de extractores con copas de succión método útil para monitoreo limitado a suelos relativamente húmedos.

El extracto de saturación implica la obtención de una muestra líquida para análisis o sea a un contenido de humedad muy superior que el contenido de humedad usado para análisis de rutina de la salinidad o para propósito de caracterización. Los extractos con relaciones suelo agua amplias predeterminadas (1:2, 1:5, 1:10) son más fáciles de hacer que el de saturación, pero se debe tener en cuenta que estos tienen menos relación con la composición y contenido del agua del suelo en el campo. Según Rhoades (1996) más importante aún es el hecho de que la salinidad y los posibles errores por dispersión, hidrólisis, intercambio iónico y disolución de minerales aumentan a medida que la relación suelo/agua incrementa. Cuando se toma la decisión de hacerlos y, especialmente, cuando se usa una relación suelo/agua amplia es necesario recurrir a un factor de corrección para expresar la salinidad en términos del extracto de saturación

### 5. INDICES DE DISPONIBILIDAD

Mención aparte merecen los Índices de disponibilidad. Welte et al (1960) y Suarez (1996) indican que para tener un mejor entendimiento de la disponibilidad de un nutriente se puede requerir la medición de varios índices. Este concepto es comparable con el uso de los términos Intensidad (concentración en la solución) y Capacidad (Potencialmente disponible como el intercambiable y la fracción orgánicamente ligada, Marschner, 1986). No parece posible que se puedan establecer índices generales de disponibilidad que pueda ser utilizado en todos los suelos debido a las diferencias en mineralogía, contenido de materia orgánica y condiciones químicas.

Según Suarez (1996), no debe causar sorpresa que extractantes diferentes sean utilizados en diferentes ambientes, adoptados después de comprobar que el extractante produce una correlación adecuada del suelo con los factores de la planta. Adicionalmente, muchos índices de disponibilidad son modificaciones de los métodos cuantitativos adoptados por laboratorios de análisis de rutina para evaluación agrícola. Estas modificaciones, generalmente, han sido implementadas para ahorrar tiempo y reducir volúmenes de extractantes.

La respuesta específica a Mg, Ca, Sr y Ba depende de la disponibilidad y de la naturaleza de los constituyentes del suelo, de las relaciones iónicas de la ocurrencia de competencias o desbalances, tanto como de las especies específicas de plantas y aún de la respuesta varietal. Un atajo a los índices de disponibilidad lo ilustra el caso de las deficiencias de Ca en suelos altamente alcalinos. A pesar de que se pueden extraer grandes cantidades de Ca con una solución de  $\text{NH}_4\text{OAc}$  amortiguada a pH 7, un pH de 10 o más limita la solubilidad del carbonato de calcio en condiciones de campo. En este caso el extracto enmascara la deficiencia potencial de Ca el desbalance iónico, lo que puede producir una respuesta adversa de la planta.

Algunos autores han propuesto el uso de relaciones como la de Ca respecto a los otros cationes en solución ( $\text{Ca}_s/\text{TC}_s$ ), las relaciones Ca/Mg y Mg/Ca en solución, como indicador de la disponibilidad de K el uso de los conceptos Intensidad (I), Cantidad (Q) y Capacidad (Q/I).

Las plantas absorben el S como ión  $\text{SO}_4^-$  pero también pueden utilizar algunos compuestos orgánicos de S. La disponibilidad del S orgánico depende de su mineralización, la cual es

afectada por factores climáticos como temperatura y precipitación. En Colombia la rata de mineralización disminuye con la altura.

La determinación del S disponible para las plantas es complicada por el hecho de que diversas fuentes, además del suelo mismo, concurren a satisfacer las necesidades de las plantas. Estas fuentes incluyen las lluvias y el agua de riego, el S atmosférico y el presente en fertilizantes y pesticidas. De esas fuentes la contribución de las lluvias y la absorción directa por suelos y plantas de la atmósfera es la más difícil de evaluar.

Se han propuesto numerosas metodologías como extracción con agua, extracción con varias sales y ácidos, mineralización de S durante incubación, crecimiento microbial, crecimiento de plantas y contenido elemental y determinación del valor "A". El S removido por los varios extractantes tiende a caer dentro de los siguientes grupos: i) sulfato rápidamente soluble, ii) rápidamente soluble y porciones de sulfato adsorbido y iii) rápidamente soluble y porciones de sulfato adsorbido y de S orgánico. Ninguno de dichos métodos ha probado ser superior a los otros para predecir las necesidades de fertilización.

### 6. CONSIDERACIONES FINALES

Por su rapidez, sencillez y economía el análisis de suelos ha sido una valiosa herramienta para el diagnóstico de la fertilidad del suelo y sus problemas. Su uso acertado depende no solo de la selección correlación y calibración de una metodología de extracción adecuada, sino también de la aplicación del conocimiento que se tenga del suelo, su ambiente externo e interno, propiedades físicas, químicas y biológicas.

Un papel destacado lo juegan las interacciones iónicas que en él tienen lugar, la fuerza iónica, los procesos de precipitación y disolución en respuesta a efectos externos e internos. Una metodología que funciona bien en otras latitudes necesariamente no lo hace en condiciones tropicales en donde la geología y el ambiente pueden jugar un papel determinante. Es responsabilidad de los encargados de los laboratorios de suelos el verificar si una metodología está funcionando bien.

La instrumentación analítica ofrece muchas y novedosas alternativas para la determinación de los diversos nutrientes. Todas tienen ventajas y desventajas y muchas ofrecen limitaciones de desarrollo que debe o están en camino de ser subsanadas. El uso de instrumentos muchas veces requiere que se revisen los procedimientos de extracción.

La Ciencia y en especial la del suelo, avanza rápidamente por lo que el uso de las innovaciones en el conocimiento nos obliga a ir un paso adelante utilizando los nuevos conocimientos para desarrollar instrumentos que hagan menos riesgosa la agricultura. La búsqueda e implementación de nuevas metodologías analíticas es una responsabilidad de quienes tenemos la fortuna de ocuparnos de la docencia, la investigación, el servicio de análisis de suelos y la asesoría a los productores

### 7. BIBLIOGRAFIA

Armhein y Suarez, D.L: 1996. Procedure for determining sodium-calcium selectivity in calcareous and gypsiferous soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 54: 999-1007.

- Borrero, J. y García, A. 2006. Dinámica y Disponibilidad de Potasio en suelos alcalinos del Valle del Río Cauca dedicados a producción de Caña de Azúcar. Memorias VII Congreso Tecnicaza. Cali septiembre 6-8 de 2006. Vol 1 pp:98-111
- Bremner, J.M. 1996. Nitrogen-Total. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:1085-1120.
- Bower, C.A.; Reitemeier, R.F and M. Fireman. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil Sci. 73:251-261.
- Chang, S.C. and Jackson, M.L. 1957. Fractionation of soil Phosphorus. Soil Sci. 84: 133-144.
- Doberman, A. y Fairhurst, T. 2000. Arroz: Desórdenes nutricionales y manejo de Nutrientes. Potash & Phosphate Institute-IRRI-Fertisa. 213 p.
- Frankenberger, W.T. Jr.; Tabatabai, M.A.; Adriano, D.C. and Doner, H.E. 1996. Bromine, Chlorine and Fluorine. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:833-868.
- Fendorf, S. and Sparks, D.L. 1996. X-Ray Absorption Fine Structure Spectrometry. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:376-416.
- García, A. 1986. Cation Exchange in Southern California Soils. Ph. D. Dissertation. University of California Riverside, 132 p.
- García, A. y González, A. 2001. Los elementos secundarios en suelos alcalinos. Memorias Seminario Taller "Los elementos secundarios (Ca, Mg y S) y el Silicio en la Agricultura".. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Comité Regional de Cundinamarca y Boyacá. Bogotá. Pp: 50-71.
- González-Rubio, A.; Plá-Sentís, I. and García O, A. 2000. Effect of high bicarbonate waters on the physical conditions of some Colombian soils. In: Book of Abstracts Remade Lands 2000, International Conference on the remediation and management of Degraded Lands. Fremantle, Western Australia, 30 November-2 December, 2000. pp. 146-147.
- Gómez, C. A. 1993. Comparación de métodos para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos salinos y/o sódicos del valle Geográfico del Río Cauca. Tesis de grado M.Sc. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Palmira. 251p.
- González, A. 2001. Evaluación de la dinámica y los efectos de los bicarbonatos de las aguas de riego sobre las propiedades de los suelos de áreas del Valle del Cauca y Tolima. Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Postgrados Sede Palmira. Tesis doctoral.
- Goulding, K.W.T. 1987. Potassium fixation and release. Proc. Colloq. Int. Potash Inst. 20:137-154.
- Helmke, P.A. 1996. Neutron Activation Analysis. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:140-160.
- Helmke, P.A. and Sparks, D.L. 1996. Lithium, Sodium, Potassium, Rubidium and Cesium. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:550-574.
- Jungk, A. and Claassen, N. 1997. Interactions between root and soil affecting diffusion. In: Sparks, D.L (Ed), Adv. Agron. Vol.61:75 - 84.
- Keren, R. 1996. Boron. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:603-626.
- Kuo, S. 1991. Phosphate buffering and availability in soils. Trends Soil Sci. 1:203-214.
- Kuo, S. 1996. Phosphorus. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:869-920.
- Loeppert, R.L. and Inskeep, W.P. 1996. Iron. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:639-664.
- Liu, Y. J., Laird, D.A. and Barak, P. 1997. Release and fixation of ammonium and potassium under long-term fertility management. In: Soil Sci. Soc. Am. J. Vol 61: 310-314.
- Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for Zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 421-428.
- Lindsay, W.L., and Schwab, A.P. 1982. The chemistry of iron in soils and its availability to plants. J. Plant. Nutr. 5:821-840.
- Lumbanraja, J. and Evangelou, V.P. 1994. Adsorption - desorption of potassium and ammonium at low cation concentrations in three Kentucky subsoils. In: Soil Science. Vol. 157, No .5.

- Marschner, H. 1986. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press. Second Edition. 889 p.
- Melsted, S.W. and Peck, T.R. 1973. The principles of Soil Testing. Soil Testing and Plant Analysis. Soil Science society of America, In. Madison, Wisconsin p: 13-22.
- Mulvaney, R.L. 1996. Nitrogen-Inorganic Forms. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:1123-1184.
- Nelson, D.W. and Sommers, L.E. 1996. Total carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:961- 1010.
- Reed, S.T and Martens, D.C. 1996. Copper and Zinc. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:703-722.
- Rich, C.I. 1972. Potassium in minerals. Proc. Colloq. Int. Potash. Inst. 9:15-31
- Rhoades, J.D. 1996. Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:417-436.
- Rhoades, J.D. 1990. Determining soil salinity from measurements of electrical conductivity. Commun. Soil. Sci. Plant Anal. 21:861-901
- Sharpley, A.N. 1990. Reaction of fertilizer potassium in soils of differing mineralogy. *In*: Soil Science. Vol. 149. No.1: 44-52.
- Sims, J.L. 1996. Molybdenum and Cobalt. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:723-738.
- Sparks, D.L. 1987. Potassium dynamics in soil. Adv. Soil. Sci. 6, 1-63.
- Sparks, D.L. and Huang, P.M. 1985. Physical chemistry of soil potassium p. 201-176. In. R.E. Munson (ed) Potassium in Agriculture. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI.
- Suarez, D.L. 1996. Beryllium, Magnesium, Calcium, Strontium and Barium Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:91-140.
- Sumner, M.E. and Miller, W.P. 1996. Cation Exchange Capacity and Exchange Coefficients. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:1201-1230.
- Stevenson, F.J. 1996. Nitrogen-Organic Forms. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:1185-1200.
- Szabolcs, I.K. 1990. Status and dynamics in salt affected soils. In: Development of K-Fertilizer Recommendations. (1990: Soligorsk). Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Colloquium of the International Potash Institute. Bern: International Potash Institute. 402p.
- Senesi, N. Electron Spin (or Paramagnetic) Resonance Spectrometry. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:323-356.
- Tabatabai, M.A. and Frankenberger, W.T. Jr.. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:225-246.
- Usherwood, N.R. 1978. The interaction of potassium with other ions in soils and plants. *In*: Suelos Ecuatoriales. Vol. 9, No.2: 29-36.
- Valenzuela, I.G.; Amezcua, E. and García-Ocampo, A. 2002. Characterization of soluble magnesium salts in some soils of the Cauca River Valley (Colombia). Abstracts 17<sup>th</sup> World Congress of soil Science. 14-21 August 2002, Bangkok, Thailand. Paper No. 2196, Vol. III p.1153.
- Soltanpour, P.N.; Johnson, G.W; Workman, S.M.; Benton Jones J.Jr. and Miller, R.O. 1996. Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry and Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:91-140.
- Wright, R.J and Stuczynski. 1996. Atomic Absorption and Flame Emission Spectrometry. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Ed. D.L: Sparks SSSA Book Series: 5. pp:65-90.
- Welch, C.D. and Wise, R.A. Opportunities to improve Soil Testing Programs. Soil testing and Plant Analysis. L.M. Walsh and J.D. Beaton Eds. Soil Science Society, Inc. Madison, Wisconsin. Pp:1-12.
- Welte, E.; Werner, W. and Niederbudde, E.A. 1960. Zur frage der Magnesium-Dynamique im Boden. pp246-252.English summary.