

CAPÍTULO 4

GÉNESIS Y EVOLUCIÓN DE LOS SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS DEL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA

4. GÉNESIS Y EVOLUCIÓN DE LOS SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS DEL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA

La génesis y la evolución de los SSA está directamente relacionada con el conocimiento de los factores y procesos bioquímicos que han llevado a su formación. El Soil Survey Staff (2010) contempla de forma precisa las diferencias que en su origen tienen los SSA, respecto a los suelos minerales u orgánicos convencionales.

El carácter atípico de estos suelos hace muy específico y complejo el entendimiento de su dinámica bioquímica asociada con elementos como S, Fe, Al, cuyos niveles de concentración generan un cuadro de acidez y salinidad que impacta en diferente grado el suelo, la calidad química y biológica del agua y el entorno.

La definición de los factores y procesos de formación de SSA se hizo a partir de estudios detallados, donde se reunió la experiencia de la caracterización en campo y las evaluaciones cuantitativas compiladas en el levantamiento de suelos realizado en el área de estudio; lo anterior complementado con lo descrito por Pons *et al.* (1982), Lines y Sammut (1999), Rosicky *et al.* (2002) y Dent (1986), para la caracterización e identificación de SSA tropicales continentales y costeros.

Los SSA del valle alto del río Chicamocha presentan características particulares en su formación, como el origen lacustre de la mayoría de sus componentes, la incidencia directa del flujo continuo de aguas ricas en sulfatos que se derivan de formaciones geológicas circundantes, nacimientos hidrotermales y procesos bioquímicos fuertes de sulfatación, como resultado de las adecuaciones de riego y drenaje realizados en los últimos 60 años. Esporádicamente se encuentra esta situación en suelos

continentales del mundo, ya que generalmente se forman bajo condiciones marinas (Pons et al., 1982; Dent & Dawson, 2000). Ejemplos de la formación de SSA continentales son los suelos piríticos turbosos de papiro en Uganda (Chuxia, 2012); arenas piríticas en algunos valles del este de Holanda (Poelman, 1973) y suelos turbosos piríticos en Minnesota (Pons et al., 1982).

4.1 FACTORES QUE HAN INDUCIDO LA FORMACIÓN DE SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS

Existen factores comunes en la formación de los suelos relacionados con el paisaje, el material parental, el tiempo de evolución, el clima y la actividad de organismos o antrópica, lo que hace pensar que para los SSA lacustres del trópico y del valle alto del río Chicamocha no hay excepción, y es así como se reconocen cinco condiciones que permiten identificar factores de formación en este tipo de suelos:

- Fisiografía de áreas planas con drenaje deficiente y susceptibilidad de inundación.
- Acumulación de materiales orgánicos con depositación de sedimentos minerales ricos en hierro y aluminio.
- Flujos internos continuos de aguas ricas en sulfatos.
- Presencia de bacterias reductoras y oxidantes de azufre y hierro.
- Prácticas de aireación por efecto de drenaje artificial.

4.1.1 Fisiografía de áreas planas con drenaje deficiente y susceptibilidad de inundación. El conocimiento detallado de la fisiografía es clave en el entendimiento de la génesis de SSA, más aún cuando en un mismo paisaje de planicie existe alta variabilidad en las formas de terreno. La mayoría de suelos sulfatados ácidos (SSA) continentales se presentan sobre terrenos planos de origen aluvial o lacustre de depositación de materiales (pantanos, ciénagas, áreas lacustres mal drenadas, terrazas bajas, cubetas o basines). Estas áreas son zonas de captación mal drenadas, las cuales favorecen la depositación de materiales orgánicos, minerales y acumulación de sales sulfatadas (Dent, 1986).

La ubicación de suelos en áreas planas y pantanosas constituye una característica geomorfológica típica que propicia la formación de SSA, de esta forma se favorece en el tiempo la acumulación de materiales sulfídicos y la posterior aparición de horizontes diagnósticos sulfúricos (Rosicky et al., 2004).

La planicie donde se ubica el valle alto del río Chicamocha es el resultado de un proceso de relleno fluvio-lacustre desarrollado dentro de una cuenca con flujo restringido en su salida natural (Belencito) por barreras estructurales de origen tectónico (HIMAT, 1985). Lo anterior limita notoriamente su drenaje natural y facilita encharcamientos periódicos que imprimen características edafológicas y morfogenéticas variadas.

Desde el punto de vista longitudinal, el cauce del río Chicamocha presenta un gradiente muy baja $0,5 \text{ mkm}^{-1}$ en el sector de Sochagota y Nobsa. Los datos disponibles de descarga (DRACH, 2006) permiten deducir que el nivel promedio del río se encuentra, la mayor parte del año, por encima del área de cubetas, razón por la cual estas zonas son más susceptibles a encharcamiento (DRACH, 2009). En este paisaje se ubican los SSA, que se distribuyen en un plano de inundación con formas de terreno de cubetas o basines (Figura 4.1). Es frecuente encontrar en el valle alto del Chicamocha, asociados a estas formas de terreno, suelos de composición turbosa subsuperficial a superficial con acumulación salina.



Figura 4.1 Paisaje de planicie fluvio-lacustre del valle alto del río Chicamocha: nótese la presencia de áreas pantanosas y escaldadas. Sector Ayaldas, Duitama-San Rafael.

Fuente: Gissat (2006).

En la planicie fluvio-lacustre del valle alto del río Chicamocha se diferencian dos formas de relieve, la **cubeta superior** (plano-convexa) y la **cubeta inferior** (plano-cóncava). Estas formas se caracterizan por la susceptibilidad de encharcamiento y determinan la secuencia evolutiva de los SSA de estudio (figuras 4.2 y 4.3). Los suelos de la cubeta superior presentan un horizonte superior espeso (>50 cm) de carácter mineral, procedente de coluvios sobre horizontes orgánicos de carácter sulfúrico en diferentes estados de madurez, y los suelos de la cubeta inferior un horizonte superior superficial a muy superficial, espesor 10-20 cm, de carácter organomineral, procedente de coluvios sobre horizontes orgánicos inmaduros. El mayor espesor de los materiales coluvio-aluviales hace que se privilegie el uso de la tierra agrícola en el paisaje de cubeta superior (Figura 4.2), por cuanto las raíces se alejan del contacto con horizontes sulfúricos o materiales sulfídicos, generalmente con niveles freáticos fluctuantes extremadamente ácidos y salinos.



Figura 4.2 Suelos *Sulfic Endoaquepts* en paisajes de cubeta superior: presentan materiales coluvio-aluviales finos que conforman horizontes superficiales espesos (der.), los cuales facilitan el establecimiento comercial de cultivos de cebolla de bulbo (izq.). Sector Tibasosa-Ministerio-Monquirá.

Fuente: Gissat (2006).

Los suelos de la cubeta inferior se ubican en la parte más baja del valle, con pendientes menores al 1 % y corresponden a SSA de origen orgánico (*Typic sulfosaprist* y *Typic sulfohemist*) con horizontes sulfúricos superficiales a muy superficiales que conllevan a la formación de áreas escaldadas (Figura 4.3 izq.). Dependiendo de la estacionalidad climática, los suelos habilitados

agrícolamente en el paisaje de cubeta inferior pueden verse afectados por inundación o encharcamiento en temporada de invierno (Figura 4.3 der.). Esta problemática suele ocurrir en áreas localizadas al suroeste del lago Sochagota, entre el canal de Ayalas y la zona montañosa situada en el oriente de la zona plana entre Duitama y la loma de Peña Negra; en el valle, a cada lado del canal del Cucho; terrenos en ambos lados del canal principal de drenaje en las unidades de riego Ministerio y Tibasosa; y los terrenos adyacentes al canal Transval en el sector de Vueltas. La primera y última mencionadas presentan características superficiales de contaminación salina por el alto contenido de sales del agua freática.

Si no fuera por la actividad antrópica de la canalización y drenaje del valle, muchos sectores de SSA actuales, como Cucho, Vargas, Ayalas, Transval, que se encuentran en estas formas de terreno, permanecerían como zonas pantanosas y no como SSAA.



Figura 4.3 Paisaje de SSA actuales de origen orgánico (cubeta inferior) mostrando áreas escaldadas (izq.). Encharcamiento de suelos de la cubeta inferior afectando áreas agrícolas en temporada de invierno (sector Cucho).

Fuente: Gissat (2006).

4.1.2 Acumulación de materiales orgánicos y deposición de sedimentos minerales de hierro y aluminio. De lo más reciente a lo más antiguo del Holoceno (último periodo del Cuaternario-10000 años), la acumulación e identificación del tipo de materiales que colmatan la planicie fluvio-lacustre del valle alto del río Chicamocha, tiene, según Berrio *et al.* (2004), tres fases bien definidas:

-
- Depositación del material coluvio aluvial proveniente de las lomas o colinas que circundan el valle, la cual identifica las posiciones más altas en el valle con pendientes suaves y estratificación irregular de materiales minerales gruesos y finos (Cuaternario más reciente).
 - Depositación de los sedimentos de los ríos, principalmente del Chicamocha, con estratificaciones alternas de arena, limo y arcilla (Cuaternario propiamente aluvial).
 - Sedimentos lacustres de materiales orgánicos de vegetación acuática y semiacuática (Cuaternario piso de sabana más antiguo).

Acumulación de materiales orgánicos. A partir del registro sedimentológico y palinológico de áreas pantanosas en la cuenca interandina de Duitama (Berrío et al., 2004), se deduce que los sedimentos de áreas pantanosas pertenecen al Holoceno desde hace 8000 años AP. Los sedimentos de profundidad son de carácter turboso y de materiales orgánicos constituidos por especies del género *Plantago* (formador de turba), *Agnus* y *Myrica*, que se alternaron de acuerdo con los niveles del lago y a la variación de condiciones climáticas secas y húmedas.

Este estudio revela también que la presencia de fenómenos de erosión entre 3680 y 2610 años AP en la cuenca, significó un incremento de sedimentos coluvio-aluviales, que cambió las condiciones lacustres a pantanosas, lo que explica la estratificación alternada de materiales orgánicos y minerales; bajo estas condiciones dominaron los juncos que actualmente se ven en algunos sectores como Cuche, Vargas y Ayalas (Figura 1.2).

La cubeta es una forma de terreno de tipo depresional que facilitó la acumulación de materiales orgánicos y minerales en medios húmedos. En todos los suelos muestreados en el área del DRACH se encontraron horizontes orgánicos de carácter sulfúrico o sulfídico a diferente profundidad, mayormente en estados hémicos-sápricos (Figura 4.4 izq.) y, en menor proporción, estados fíbricos a profundidad mayor, confinados a aguas freáticas ricas en sulfatos y hierro (Figura 4.4 der.).

Los contenidos de materia orgánica de los sedimentos recientes depositados en áreas continentales del trópico cálido generalmente son bajos (1-2 %),

como sucede en SSA del valle del Sinú (Combatt et al., 2004), pero pueden ser altos en áreas fluvio-lacustres del trópico alto andino, como ocurre en el valle alto del río Chicamocha, donde los contenidos de materia orgánica pueden presentar valores de 20 a 60 %, con mayor acumulación en suelos orgánicos potenciales *Typic Sulfihemists* y menor en SSA actuales orgánicos *Typic Sulfohemists*. La acumulación creciente de sedimentos orgánicos favorece aún más la formación de sulfuros metálicos (Lamontagne et al., 2004).



Figura 4.4 Materiales orgánicos en SSA: estados hémico-sápricos en *Typic sulfohemist* (izq.); material turboso y fibrico en *Typic sulfihemist*, donde se identifican tallos y raíces de vegetación constitutiva de áreas lacustres (der.).

Fuente: Gissat (2006).

De acuerdo con Pons y Breemen (1982), cuando la vegetación de pantano es escasa, la acumulación de carbono orgánico se limita, lo cual disminuye la formación de sulfuros de hierro del medio. Este fenómeno se debe a que las bacterias reductoras (desulfobrio) necesitan la materia orgánica como energía para reducir las formas de azufre oxidable en medios anegados (Dent, 1986; Brock et al., 1987).

Deposición de sedimentos ricos en hierro y aluminio. Este factor hace referencia a materiales minerales provenientes de sedimentos circundantes al valle, que son fuente directa de hierro y aluminio, necesarios para la formación de sulfuros y sulfatos metálicos en medios redox (Pons et al., 1982; Lines & Sammut, 1999; Rosicky et al., 2002). Estos minerales generalmente se mezclan y colmatan los materiales orgánicos lacustres como ocurre en el valle alto del río Chicamocha (Berrío et al., 2004).

Las formaciones geológicas, la mineralogía de los sedimentos coluvio-aluviales y su relación con horizontes superficiales, facilitan el conocimiento del origen de los minerales de hierro y aluminio de los suelos investigados.

Los sedimentos minerales que tienen influencia directa en la formación de suelos con condiciones sulfatadas ácidas en el valle alto del río Chicamocha están relacionados con las siguientes formaciones geológicas:

- *Rocas ígneas extrusivas*: los cerros situados en el sur de la localidad Vargas, entre las quebradas Pan de Azúcar y Despensas, están compuestos por una roca ígnea extrusiva, andesita, que representa uno de los cuellos volcánicos en el área de donde surgen algunas fuentes termales ricas en minerales de azufre (HIMAT, 1985).
- *Formación Cuche*: bordeando el valle desde el norte hasta un poco más al sur de la loma de Punta Larga, a ambos lados del valle aflora una secuencia monótona de limolitas, micas y areniscas de grano fino, intercaladas con arcillolitas; el color predominante de estas rocas es rojizo, por efecto de los minerales de hierro tipo hematita, de estratificación delgada (40 cm) y frecuentemente con estratificación cruzada. Sus afloramientos se encuentran también en la carretera Duitama-Tibasosa, sector Vueltas, antes de llegar a la población. La secuencia se presenta generalmente muy fracturada y con intensos repliegues. Su edad es Carboniano (HIMAT, 1985). Esta formación incide sobre unidades de suelos cuyos componentes principales son los *Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfohemists* y los *Typic Sulfihemists*.
- *Formación Tibasosa*: se encuentra extendida en la mitad oriental de los límites que enmarcan el área de estudio. Sus componentes litológicos pueden observarse en toda la vertiente derecha del valle, desde el canal de Ayalas, pasando por la loma Peña Negra en Tibasosa, hasta la loma Piedras Negras. Sobre la vertiente izquierda también aflora y pasa por los sectores de Monquirá y Ministerio, donde se ubican las unidades de suelos *Typic Sulfihemist* y *Sulfic Endoaquepts*. Esta formación está integrada en su parte basal por areniscas conglomeráticas y areniscas cuarzosas con intercalaciones de limolita morada y verde, y en su parte

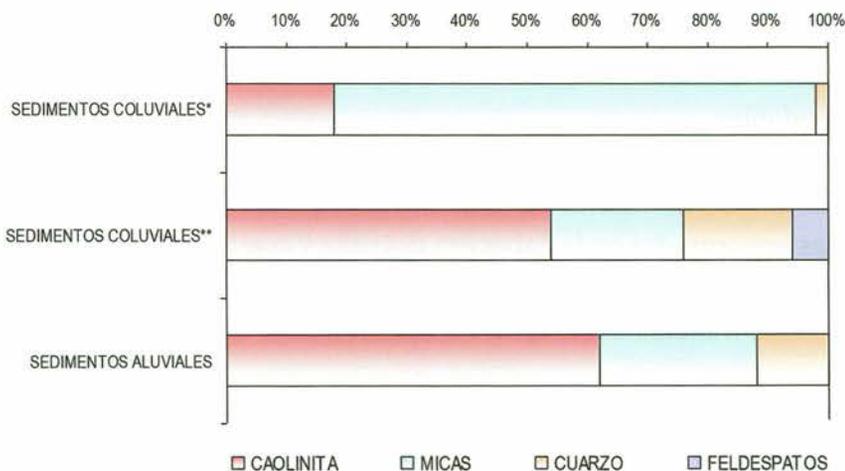
superior por sales con intercalaciones de caliza arenosa y areniscas, lo cual explicaría los procesos de autoneutralización de los suelos circundantes.

Relación de los sedimentos coluvio-aluviales con la formación de SSA. Las andesitas encontradas en la cabecera del valle y que aparecen relacionadas con nacimientos halohidrotermales explican la influencia de sales sulfatadas y de posibles minerales de hierro de origen ígneo.

La fracción mineral de los SSA proviene de la mezcla de materiales coluvio-aluviales que colmataron los sedimentos lacustres. Los materiales coluviales de la Formación Cucho y Tibasosa son los que más influencia tienen en la constitución de los horizontes superficiales de los SSA de estudio. Al realizar la cuantificación de los minerales en la fracción arena se constató que gran parte de los granos heterométricos de cuarzo presenta pátina (capa discontinua de óxido de hierro) y también hematita en forma de nódulos de tamaño fino. Lo anterior supone una fuente adicional de minerales de Fe para la formación de SSA.

Al analizar la fracción mineral de horizontes superficiales (Ap, Aj) en SSA se observa que la fracción arcillosa proveniente de los materiales coluvio-aluviales es dominante en todos los perfiles de estudio a excepción de los *Typic Sulfihemists*, donde dominan la fracciones limosa y arenosa (Tabla 3.8).

Los materiales coluvio-aluviales provenientes de las formaciones circundantes coinciden con la presencia de caolinita, micas, cuarzo y, en menor grado, feldespatos (Figura 4.5) que por herencia han imprimido los minerales primarios, que al meteorizarse por efecto de procesos de sulfatación, pueden generar formas libres de Ca^{2+} , K^+ , Fe^{2+} y Al^{3+} (Breemen, 1982). Además, se observa que los minerales de la fracción arcillosa que constituyen los sedimentos coluviales de la formación Cucho (sector Vueltas-Cucho) están dominados por las micas en un 80 % y en menor grado por caolinita (18 %).



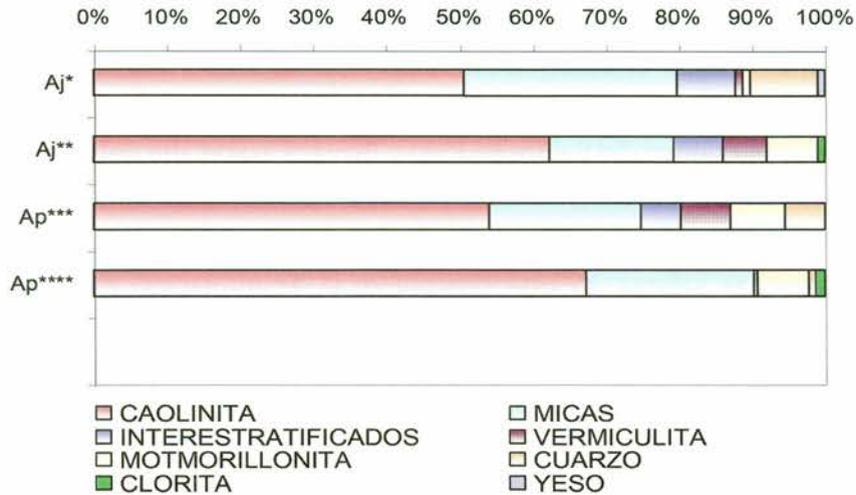
*Sedimentos de suelos coluviales de la formación Cuche, **Sedimentos basales de suelos coluviales de la formación Tibasosa.

Figura 4.5 Representación semicuantitativa de la fracción mineral de los materiales aluviales y coluviales que inciden sobre características pedogenéticas de SSA en el valle alto del río Chicamocha.

Fuente: IGAC (2006).

Al comparar los minerales de sedimentos coluviales de la Figura 4.5 de la formación Cuche con horizontes superficiales que se encuentran en el área de influencia de SSA típicos (*Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfohemists*) (Figura 4.6), se observa que no coinciden los minerales originales del material coluvial con los minerales de horizontes superficiales donde la caolinita es el mineral dominante de la fracción fina (mayor a 50 %), seguido por las micas (Figura 4.6). Lo anterior supone procesos de neosíntesis y transformación fuerte de minerales heredados por efecto del ácido sulfúrico en medios sulfatados y la consecuente inestabilidad de las arcillas, fenómeno ampliamente explicado por Breemen (1982) y Frink (1972).

Caso contrario sucede con horizontes superficiales de los *Typic Sulfaquepts* y de los *Sulfic Endoaquepts* que coinciden con minerales heredados de caolinita y micas en similares proporciones que sedimentos aluviales y minerales coluviales de la formación Tibasosa. Este fenómeno se debe a que los horizontes superficiales son menos afectados por condiciones sulfatadas ácidas, debido a que los horizontes sulfúricos se encuentran a mayor profundidad y no en superficie como ocurre con horizontes Aj de los *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfohemists*.



* Typic Sulfosaprists, ** Typic Sulfohemists, *** Typic Sulfihemists, ****Typic Sulfaquepts.

Figura 4.6 Representación semicuantitativa de la fracción mineral arcillosa (difracción de rayos X) de horizontes superficiales en SSA del valle alto del Chicamocha.

Fuente: IGAC (2006).

La composición de los materiales coluviales que se presenta en estos suelos comprueba la fuente de Al^{3+} y Fe^{2+} necesarios para su condición sulfatada ácida porque los minerales meteorizables de micas se pueden convertir en aluminatos y aluminosilicatos en forma de arcillas de tipo 1:1 o como minerales de oxihidróxidos de Fe^{2+} y Al^{3+} a medida que se incrementa la acidez en medios extremadamente ácidos (University of Montana, 2000).

Los minerales secundarios que se encuentran generalmente en SSA son autogénicos (formación *in situ*) de óxidos, hidróxidos, sulfatos, carbonatos y fosfatos de Fe^{2+} y Al^{3+} y arcillas de neoformación como caolinitas (Breemen, 1982). Estos se originan por las características del material parental (minerales primarios y orgánicos), el flujo interno de aguas enriquecidas en metales de azufre y la dinámica bioquímica como la formación de sulfuros metálicos (Pons et al., 1982; Fitzpatrick, 1996).

4.1.3 Flujos internos continuos de aguas ricas en sulfatos. El azufre, como elemento fundamental en la formación de SSA, se origina de sulfatos de mar, sedimentos antiguos y materiales biológicos en áreas costeras (Pons et al., 1982; Bloomfield & Coulter, 1973), pero en SSA continentales, como los del valle alto del río Chicamocha, se origina a partir de fuentes internas

azufradas provenientes de aguas halotermales y fuentes hídricas geológicas salinas, que drenan al valle. La alteración de sulfuros y la explotación de sales de sulfato de sodio aparecen como evidencia de esta afirmación en sectores de la cuenca del Salitre en Paipa, Boyacá, parte alta del valle (Castro & Gómez, 2004). Lo anterior crea un medio propicio de acumulación de sulfatos en suelos de la planicie lacustre por movimientos verticales de aguas freáticas salinas, lo que promueve la acumulación de materiales sulfídicos en las zonas depresionales y mal drenadas, proceso que facilita los fenómenos de sulfhidrización descrito ampliamente por Lamontagne *et al.* (2004), como primera etapa en la formación de SSA (Sección 4.2.2).

Es un hecho que las aguas subterráneas del valle presentan alta carga de sales sulfatadas, como lo demuestran los datos de pozos freáticos de observación, no solo en las áreas de reconocido aporte de fuentes salinas (Salitre, Sochagota), sino en otros sectores como Tibasosa, Nobsa y Sogamoso, lo que corrobora el supuesto del flujo subterráneo restringido por barreras estructurales que no permiten la renovación del agua, pero sí favorecen un incremento progresivo de la salinidad (Castro & Gómez, 2004).

Las manifestaciones de aguas termales alcanzan la superficie a través de sistemas de fracturas (falla Salitre) procedentes de focos de actividad hidrotermal. Están relacionadas muy probablemente con cuerpos intrusivos del área de Olitas (quebradas Pan de Azúcar y Despensas) (HIMAT, 1985). La ubicación de las aguas termales en la cabecera del valle, afecta directamente el flujo interno de aguas freáticas de la planicie favoreciendo la acumulación de sulfuros y las condiciones de sulfatación en los suelos.

La caracterización de aguas freáticas de los cinco perfiles modales de SSA estudiados, evidencia alta carga de sulfatos (Tabla 4.1), siendo este un componente importante de la pedogénesis y dinámica de condiciones sulfatadas ácidas de suelos del valle alto del Chicamocha. Esta fuente continúa de sulfatos se convierte en un factor de formación de SSA, aspecto que ha sido descrito en otros ambientes por Pons *et al.* (1982), Lines y Sammut (1999), Rosicky *et al.* (2002) y Poelman (1973).

Tabla 4.1 Caracterización de aguas freáticas en SSA. Distrito de Riego Alto Chicamocha.

Perfil ¹ modal	pH	CE dS m ⁻¹	² RS	RAS	³ CLASE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Fe ²⁺	Al ³⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Si ⁴⁺
						meq L ⁻¹				mg L ⁻¹			meq L ⁻¹	
Typic Sulfaquepts	3,4	5,74	0,06	4,0	C4S1	24,3	11,3	0,37	17,1	195,3	75,6	3686	5	5
Typic Sulfohemists	3,3	3,11	0,00	0,6	C4S1	6,5	1,5	0,2	1,2	172,9	242	2822	0,1	7,5
Typic Sulfosaprists	3,4	7,76	0,09	8,8	C4S1	22,3	19	1,1	39,8	182,2	61,2	5664	11,3	7,5
Typic Sulfihemists	4,8	14,02	0,37	22,1	C4S3	24	29,1	4,8	114	10,62	11,7	5808	45,7	1
Sulfic Endoaquepts	5,1	4,71	0,23	19,2	C4S3	4,8	2,6	1,1	37	61,32	1,17	2073	10,1	1,8

¹Profundidad de toma de la muestra 1,2m. ²RS: relación (Cl/SO₄²⁻), ³calidad de agua según normas Riverside Salinity Laboratory.

Fuente: Gissat, 2006.

A continuación se discuten los resultados sobre indicadores químicos de aguas freáticas que identifican SSA:

Medida de la Acidez en agua (pH): si el pH del agua muestreada a nivel del suelo se encuentra entre 3,5 y 4,5, existe una probabilidad media de estar bajo SSA actuales. Pero si el pH del agua de drenaje es menor a 3,5, el medio está asociado directamente con SSA maduros oxidados (actuales) en contacto directo con horizontes sulfúricos. En la Tabla 4.1 se presentan aguas freáticas ultraácidas (<3,5), criterio que refleja la formación de SSA actuales con restricciones severas para uso agrícola. También se observa que los pH de aguas freáticas en contacto con materiales sulfúricos (*Typic Sulfihemists* y *Sulfic Endoaquepts*) son ligeramente ácidos, debido a la condición de reducción del sistema y a la capacidad de autoneutralización.

Los fenómenos de reducción y acumulación de sulfuros se comprueban en los pozos freaticométricos del DRACH, donde, a una profundidad mayor a 4 m de la superficie, se aumentan las concentraciones de azufre(S) con pH cercanos a 8,0, bajo condiciones anaeróbicas (Castro & Gómez, 2004).

Medida de la salinidad en agua: con CE>2dSm⁻¹ se debe tener en cuenta la relación entre aniones Cl⁻/SO₄²⁻; valores entre 4-6, el agua tiene una afectación media de sulfatos, y una relación menor a 4 tiene propiedades de efluentes con características sulfatadas. Como referente la relación Cl⁻/SO₄²⁻ en agua de mar es de 7.

Las aguas freáticas muestreadas de los perfiles modales son salinas y presentan una relación $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ menor a 1 en todos los casos, lo que demuestra la existencia de una alta carga de sales solubles sulfatadas (Tabla 4.1). De otra parte, valores mayores a 1500 mg L^{-1} de SO_4^{2-} ($>30 \text{ meq L}^{-1}$) en agua, se consideran provenientes de SSA; al comparar este referente con las concentraciones de sulfatos de las aguas estudiadas, se encuentra que en todos los casos este nivel fue superado. La oxidación de sulfuros a sulfatos hace que este anión domine sobre el Cl^- con una relación estrecha y menor a 1. En medios sulfatados con bajas concentraciones de Cl^- hay mayor proliferación de bacterias oxidantes de azufre (Brock et al., 1987).

Para la zona de estudio se considera que el agua de baja salinidad ($<0,5 \text{ dS m}^{-1}$) tiene poca afectación de sulfatos SO_4^{2-} , y valores mayores a 500 mg L^{-1} de sulfatos SO_4^{2-} corresponden a aguas provenientes de SSA (Gissat, 2006).

Medida del aluminio y silicio: niveles entre 1 a 5 mg L^{-1} de Al^{3+} determinan una tendencia sulfatada ácida, valores mayores a 5 mg L^{-1} indican que las aguas de drenaje provienen de SSA (Dent y Dawson, 2000). Estos elementos constituyen una característica de evaluación muy importante; en este sentido se observan altas concentraciones de aluminio soluble mayores a 10 mg L^{-1} , lo cual se relaciona con SSA actuales (*Typic Sulfaquepts*, *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfohemists*), pH menores $3,5$ (Tabla 4.1, Figura 4.7) y formación de sales de sulfato de aluminio (Tabla 4.7). Las mayores concentraciones de aluminio se observan en campo con una apariencia traslúcida en sus aguas, característica propias de aguas ricas en aluminio (Dent & Dawson, 2000).

Breemen (1982) demostró que el Al^{3+} soluble con valores de pH menores a $4,5$, incrementa notoriamente hasta diez veces su concentración cuando el pH cae a rangos menores a $3,5$. Esta tendencia se observa en la Figura 4.7, para el aluminio soluble en aguas freáticas sulfatadas ácidas, donde la concentración de 10 mg L^{-1} en un pH de $4,5$ aumentó diez veces a valores mayores a 100 mg L^{-1} cuando el pH decrece por debajo de $3,5$.

La severa acidez que ocurre en suelos sulfatados ácidos acelera los procesos de alteración de aluminosilicatos e incrementa la solubilidad, tanto del

aluminio, como del silicio (Dent, 1986; Breemen, 1982). Este fenómeno se comprueba con las mayores concentraciones de Si soluble que ocurre en aguas freáticas y de drenaje de los SSA actuales más oxidados de estudio (*Typic Sulfohemists*, *Typic Sulfosaprists* y los *Typic Sulfaquepts*) con niveles de silicio mayores a 5 meq L⁻¹ a pH menores a 3,5 (Tabla 4.1, Figura 4.7), lo cual coincide con horizontes diagnósticos fuertemente alterados en su componente mineral y la presencia de silicio libre.

Las altas concentraciones de Al³⁺ en el agua de drenaje constituyen uno de los principales riesgos de SSA por su efecto tóxico al medio, por la contaminación de otras fuentes potables o de uso agrícola (Hicks et al., 2002), donde el flujo de Al³⁺ depende del grado de oxidación actual del SSA. Las menores concentraciones de Al³⁺ se encontraron en los *Typic Sulfihemists* y *Sulfic Endoaquepts*, suelos con menos impacto en los procesos de sulfatación. En campo, estos suelos presentan condiciones favorables para el establecimiento de cultivos tolerantes, dado que las concentraciones de Al soluble son cercanas a 1 mg L⁻¹.

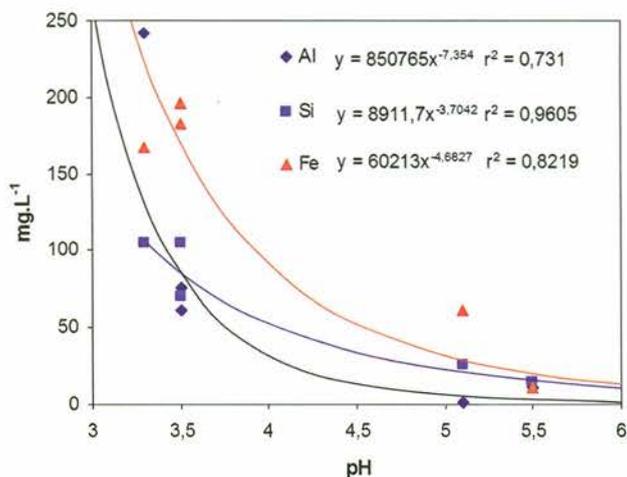


Figura 4.7 Relación entre el pH y la variación del aluminio, hierro y silicio solubles (mg L⁻¹) en aguas freáticas sulfatadas ácidas del valle alto del río Chicamocha.

Fuente: Gómez (2006).

Medida del hierro en agua. El rango de Fe soluble en aguas varía entre 10 y 50 mg L⁻¹. Según Dent y Dawson (2000), el drenaje rico en hierro es una característica que está relacionada con procesos de alta oxidación en SSA, en este caso las aguas de drenaje generalmente presentan concentraciones

superiores a 50 mg L^{-1} de hierro soluble. En las aguas freáticas de estudio se registraron valores mayores a 50 mg L^{-1} hasta 200 mg L^{-1} (Tabla 4.1), lo que está relacionado con condiciones ultraácidas de SSA actuales.

Valores menores a 50 mg L^{-1} de Fe soluble se presentaron en aguas freáticas de SSA potenciales de los *Typic Sulfihemists*, debido a que los productos de oxidación de los materiales sulfídicos (sulfuros de hierro) son neutralizados por la formación de precipitados ocre de hidróxidos de hierro amorfo o de moteados amarillos a las orillas de los drenajes (Figura 4.8), como resultado de una gran neutralización del hierro soluble y acidez, que termina viéndose reflejado en una disminución importante de las formas solubles de este elemento, lo que ocurre a pH superiores a 4,5 (Hicks et al., 2002).



Figura 4.8 Aguas freáticas y de drenaje de color ocre en *Typic Sulfihemists*: en los bordes de los drenajes se observan precipitados de formas férricas generalmente a pH mayores a 4,0.

Fuente: Gissat (2006).

4.1.4 Bacterias óxido reductoras de azufre y hierro. Las reacciones redox del azufre y del hierro por parte de microorganismos conforman un factor esencial en la formación de SSA. Las bacterias son acidófilas autótrofas que obtienen su energía de la oxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos (litótrofas). La capacidad para crecer en suelos sulfatados ácidos es una propiedad de un grupo específico de microorganismos del género *Desulfovibrio* para medios reducidos y de *Acidithiobacillus* para medios oxidados (Blomfield, 1972).

Bacterias reductoras en SSA. El sulfuro de hidrógeno (H_2S) es el primer producto en la reducción de azufre en medios anegados y orgánicos, este da la sensación de olor a huevo podrido cuando se perturban los sedimentos reducidos en áreas pantanosas (Dent, 1986).

La especie *Desulfovibrio desulfuricans* y bacterias del género *Desulfumacolum* han sido caracterizadas en ambientes sulfatados ácidos en medios anegados, inicialmente identificadas por Cambell y Postgate (1965), citados por Bloomfield y Coulter (1973). Estas bacterias son las responsables de la formación de sulfuros metálicos en condiciones anaerobias, tomando los electrones del sulfato y la energía de la materia orgánica.

Ambos géneros se presentan en suelos y aguas, son obligadas anaerobias, pero no se mueren por exposición al aire, solo se inactivan hasta que el medio sea anegado. Lo anterior explica la importancia de las fluctuaciones del nivel freático, estación climática, inundaciones y encharcamientos, para entender la dinámica bioquímica de los SSA.

Experimentaciones realizadas por Bloomfield (1972) en la reducción biológica de sulfatos, mostraron que el sulfato puede llegar a ser inestable con un potencial redox cercano a -150 mV y pH mayores a 5. Las bacterias reductoras de azufre se activan bajo estas condiciones en SSA.

La reducción biológica de sulfatos tiene una importancia práctica y es la causa de la precipitación de sulfuros metálicos, como la pirita, en suelos sulfatados ácidos potenciales, factor inicial en la formación de condiciones de SSA potenciales y de materiales sulfídicos; además, de la solubilidad del hierro ferroso en aguas de drenaje, con efecto tóxico para el medio biótico (Dent, 1986; Brock et al., 1987).

En los SSA del valle alto del Chicamocha, aún no han sido caracterizadas estas bacterias reductoras, pero las condiciones para su actividad pueden presentarse en materiales sulfídicos a una profundidad mayor a 1,5 m, donde se presenta una saturación continua de agua freática concentrada en sulfatos en medios reductores y alta presencia de materiales orgánicos en medios de reacción, cercana a la neutralidad.

Bacterias oxidantes en SSA. Las bacterias oxidantes de azufre y hierro se adaptan a suelos extremadamente ácidos, muchas de las formas que sobreviven a este medio tienen la capacidad de crecer en forma litotrófica empleando hierro ferroso (II) y S elemental como donador de electrones (Brock et al., 1987; Stanley, 1994).

Las bacterias reconocidas son especies de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*. Contienen bacilos Gram negativos, con flagelo polar, son capaces de derivar su energía de la oxidación del azufre elemental, sulfuros y tiosulfatos (Brock et al., 1987; Stanley, 1994). *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, son especies que toman el S y Fe principalmente de sedimentos minerales, pero en medios orgánicos se adaptan y pueden utilizar el azufre de la materia orgánica como medio de sustrato, especialmente *A. thiooxidans* (Brock et al., 1987; Ehrlich, 1990).

A. ferrooxidans es reconocida como la bacteria responsable de la oxidación del hierro y compuestos de sulfuros inorgánicos, es estrictamente autótrofa y obtiene el carbón por fijación atmosférica del dióxido de carbono (Stanley et al., 1994). Las bacterias correspondientes trabajan a una temperatura entre 15 y 30 °C, y a una humedad óptima cercana a capacidad de campo. Son tolerantes a altas concentraciones metálicas, pero iones de cloro restringen su actividad (Ehrlich, 1990).

A. ferrooxidans es generalmente asumida como aerobia obligada, pero en condiciones anaeróbicas puede crecer con azufre elemental utilizando iones férricos como aceptor de electrones; esto indica que la bacteria puede ser considerada como anaerobia facultativa en ciertos casos, y juega un papel importante en el ciclo del hierro y azufre en medios ácidos (Pronk et al., 1994).

Con la dinámica microbiológica de las bacterias oxidorreductoras de Fe y S, se establece un ciclo de transformación mediante la acción combinada de las bacterias quimioacidolitótrofas *Acidithiobacillus* y organismos que llevan a cabo la respiración anaeróbica como bacterias reductoras de azufre (SRB) *Desulfovibrio* y *Desulfotomaculum sp.*, lo que explica la supervivencia de estos microorganismos y la dinámica bioquímica en SSA (Jacq, 1972; Nguyen et al., 1993).

Las bacterias oxidantes en SSA están asociadas directamente a la producción excesiva de ácido sulfúrico, su proliferación en medios oxidados acelera drásticamente los procesos de acidificación en estos suelos. Inicialmente es una oxidación lenta causada por el drenaje y luego es rápida, catalizada por la acción de *Acidithiobacillus ferrooxidans* con pH inferiores a 4,0. En el proceso inicial de acidificación a pH menores a 6,0 actúa *Acidithiobacillus thiooxidans* (Dent, 1986; Ehrlich, 1990; Brock et al., 1987).

En SSA del valle alto del Chicamocha, Corredor (2005), como parte de la investigación sobre la problemática de SSA realizada por Gissat (2004), aisló e identificó poblaciones microbiales en los *Typic Sulfaquepts* y demostró que las bacterias oxidantes de S y Fe son los microorganismos más proliferantes en el suelo, lo que estuvo asociado con horizontes sulfúricos Bgj (pH menores a 3,5) como se ilustra en la Figura 4.9. Lo anterior indica y corrobora la importancia de estos organismos en la oxidación bioquímica. Al aislar las poblaciones de bacterias en este horizonte con medios específicos para bacterias oxidantes, Corredor (2005) determinó el género *Acidithiobacillus ferrooxidans* como especies acidofílicas que se forman como colonias de color naranja.

Con la actividad de estas bacterias acidofílicas y su correlación con horizontes sulfúricos, una vez más se comprueba la importancia de este factor biológico en la formación de SSA, asociado principalmente a SSA actuales maduros y oxidados, como se estableció en los *Typic Sulfaquepts* (sector Duitama-Ayalas), unidad de suelos donde se resaltan limitantes en productividad agrícola.

La oxidación de sulfuros en el agua de drenaje de suelos del valle alto del Chicamocha genera acidez con disolución de hierro y sulfatos. Esta disolución es inducida por la actividad de oxidación de las bacterias, lo que origina una apariencia rojiza en el agua, aceitosa metálica sobre la superficie (Figura 5.5) y algunas veces gelatinosa como producto de su metabolismo (Dent & Dawson, 2000).

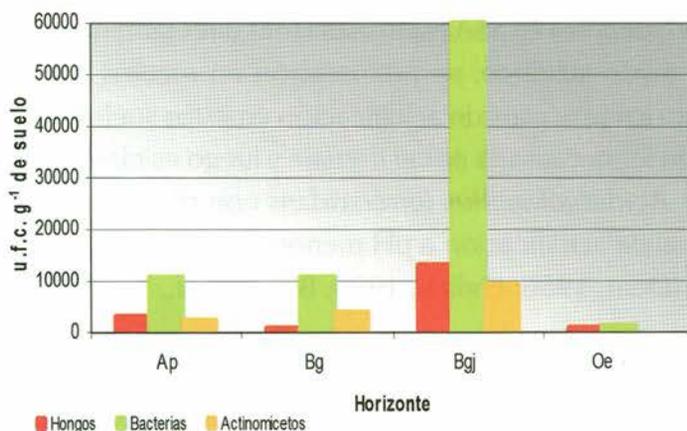


Figura 4.9 Distribución de bacterias oxidantes en SSA del valle alto del río Chicamocha. Nótese que la mayor población de bacterias oxidantes se relaciona con el horizonte sulfúrico Bgj. de los *Typic Sulfaquepts*.

Fuente: Corredor (2005).

4.1.5 Prácticas de aireación por efecto de drenajes artificiales. El uso de drenajes profundos y maquinaria agrícola expone capas internas de sulfuros de hierro (materiales sulfídicos) que inducen a la acidificación extrema del suelo con su consecuente degradación química (Dear et al., 2002, Dent, 1986). Este factor es determinante en la formación de condiciones sulfatadas ácidas actuales del valle alto del río Chicamocha, Boyacá.

La construcción de la red de drenajes destinada a habilitar tierras para la agricultura, se ha venido realizando en el área de estudio desde hace aproximadamente 50 años con una desecación gradual de las áreas pantanosas (Usochicamocha, 2002). La red de drenaje actual la conforman los canales Vargas, Surba, Cucho, Transval y Venecia, los cuales confluyen al canal principal de drenaje que atraviesa longitudinalmente el valle para descargar finalmente al río Chicamocha en proximidades de la ciudad de Sogamoso. Existen otros dos canales: Ayalas y Nobsa, que vierten directamente al río Chicamocha.

Este sistema de drenaje está integrado por estructuras de control de nivel en los canales principales, para garantizar el mantenimiento de los niveles freáticos en los suelos de turba y dar soluciones puntuales de drenaje a unidades como Cucho y Ayalas, que tienen problemas de encharcamiento.

Los suelos sulfatados potenciales pueden llegar a ser sulfatados ácidos actuales como consecuencia del drenaje. Los sulfuros de hierro son estables solamente bajo condiciones anaeróbicas (Dent, 1986). El drenaje facilita la entrada de oxígeno al suelo, y los sulfuros se oxidan generando ácido sulfúrico. Con la apertura de drenajes o vallados y su posterior limpieza, se pueden exponer los materiales sulfídicos que al oxidarse degradan áreas adyacentes, debido a procesos de sulfatación que se explican en la sección 4.2.3.

4.2 PROCESOS INVOLUCRADOS EN LA FORMACIÓN DE SSA

El proceso inicial inherente a la formación de SSA, es la **acumulación** de sedimentos órgano-minerales de origen fluvio-lacustre, junto con altas concentraciones de azufre en medios anegados. Allí suceden procesos de reducción bioquímica, los cuales originan procesos de **sulfhidrización** (formación de sulfuros de hierro), medio que caracteriza la acidez potencial y los procesos de **autoneutralización** (Dent, 1986; Bibi, 2012). Cuando estos materiales se perturban por efecto de drenajes, se generan procesos de **óxido-reducción**, oxidación y acidificación bioquímica (**sulfurización o sulfatación**), los cuales inestabilizan minerales primarios y como consecuencia se presenta **solubilización** de formas metálicas de S, Fe, Al (tóxicas) y de minerales secundarios típicos de SSA; en estos procesos se facilita el lavado de cationes básicos, lo que afecta la fertilidad química, física y biológica de los suelos.

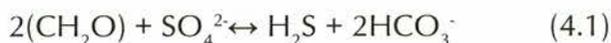
A continuación se describen los procesos más importantes relacionados con la formación de SSA en el área de estudio:

4.2.1 Sulfhidrización: formación de sulfuros de hierro y acidez potencial.

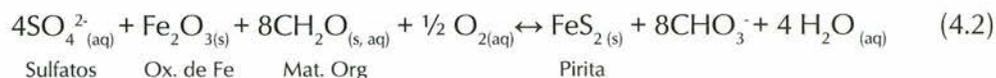
Los fenómenos de formación de sulfuros de hierro en ambientes sulfatados son descritos ampliamente por Bloomfield y Coulter (1973); Dent y Dawson (2000), Dent y Pons (1995) y Lamontagne (2004). Para SSA de la planicie fluvio-lacustre del río Chicamocha, se favorece la acumulación de sulfuros de hierro, porque se presentan o presentaron condiciones necesarias para inducir altas tasas de reducción de sulfatos, como se observa en horizontes subsuperficiales del piso lacustre con el dominio de monosulfuros de hierro (FeS) y de ácido sulfhídrico (H₂S).

La acumulación de materiales vegetales o animales junto a compuestos de hierro en presencia de aguas ricas en sulfatos, facilita la formación de sulfuros de hierro. Estos materiales orgánicos sufren procesos de descomposición y son reducidos a sulfuros por bacterias anaeróbicas y reductoras de azufre en suelos pobremente aireados (*Desulfovibrio* y *Desulfotomaculum*) (Bloomfield, 1972; Brock et al., 1987; Erlich, 1990).

El proceso descrito se simplifica en las siguientes reacciones bajo ambientes inundados con pH cercanos a la neutralidad (6,5-7,5) y un potencial redox Eh negativo (-180 a -220mV).



La formación de sulfuros de hierro producto de la disolución del sulfato en medios anegados, puede resumirse en la Ecuación 4.2 (Dent & Dawson, 2000).



Bajo estas condiciones, el sistema permanece en equilibrio, las capas de material pirítico (sulfídico) son cubiertas por agua junto a los sedimentos finos (arcillas) y con la mezcla de sedimentos orgánicos provenientes de la vegetación nativa del suelo. Estas condiciones constituyen los materiales sulfídicos y caracterizan a SSA potenciales (Lines et al., 1999).

En el valle alto del río Chicamocha, los SSA en general son actuales con un estado maduro de oxidación y acidificación. La acumulación de formas de sulfuros de hierro y la formación de materiales sulfídicos en la zona de estudio, se evidencian principalmente en profundidad y se caracterizan por los siguientes aspectos:

- En profundidad (>1m) y al contacto con el nivel freático, se perciben olores fuertes típicos de sulfuros (huevo podrido) en horizontes orgánicos Og y minerales Cg (horizonte mineral bajo condiciones redoximorficos grises (gley) asociados a altas concentraciones de materia orgánica en medios anegados), con reacción fuerte al peróxido de hidrógeno.

- Porcentaje de S total > 2 %, materia orgánica > 10 %.
- pH después de incubación y pH en peróxido menores a 2,5 para pH medidos en agua mayores a 4,0.
- Relación directa entre materiales orgánicos y % S total.
- Presencia de materiales de pirita en forma de cluster asociados a los tejidos vegetales observados en la sección delgada, como se ilustra en la Figura 4.32.
- Presencia de hierro soluble mayor a 10mg L⁻¹.

Evaluación de la prueba de incubación y peróxido de hidrógeno (H₂O₂).

La prueba del peróxido acelera los procesos oxidorreductores, simulando los efectos del potencial de acidificación en materiales sulfídicos. Esto se debe a la reacción del agente oxidante que ataca los materiales oxidables de los SSA y transforma rápidamente los sulfuros del suelo a ácido sulfúrico y a SO₂ en forma de gas, lo que produce una caída dramática del pH. Se identifican SSA potenciales si el pH medido con H₂O₂ desciende a valores cercanos o menores a 2,5, cuando el pH medido en agua es mayor a 4,0 (Dent & Dawson, 2000; Ahrent et al., 2004).

El tratamiento con peróxido de hidrógeno ofrece un método de rápida predicción de la presencia y acumulación de sulfuros de hierro. El pH obtenido por este método es mucho menor al conseguido a partir de la prueba de incubación. El pH en la prueba de incubación debe bajar mínimo 1 unidad respecto a pH medidos en campo (suelo: agua) que presenten valores mayores a 4,0 (Soil Survey Staff, 2010).

En suelos fluvioacustres del valle alto del río Chicamocha se identificaron materiales sulfídicos en los primeros 100 cm de un perfil modal orgánico clasificado como *Typic Sulfihemists*. Los pH determinados se encontraron por debajo de los límites, tanto en la prueba de peróxido (pH < 2,5), como en la prueba de incubación, los cuales disminuyeron más de una unidad respecto al pH en agua medido en campo (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Indicadores de la presencia de materiales sulfídicos en *Typic Sulfihemists* de la planicie fluvioacustre del valle alto del río Chicamocha.

Hzte_espesor (cm)	% MO	Eh mV	pHf	pHi	pHox	% S Total
Oay 0-25	45,0	420	6,84	3,8	2,52	8,6
Oey 25-70	32,0	417	4,27	4,1	3,25	2,34
Oeg 70-110x	36,7	-136	6,01	4,7	2,45	16,5

pHf: pH medido en campo (suelo: agua 1:1). pHi: pH medido después de 2 meses de incubación para demostrar la presencia de materiales sulfídicos. pHox: pH medido en peróxido de hidrógeno (30 %). Eh: potencia redox (milivoltios). MO: materia orgánica (%).

Fuente: Gómez (2006).

De acuerdo con la evaluación hecha a 220 muestras de suelos en el área de estudio (Figura 4.10), se observa que el pH de los suelos evaluados en H₂O presenta una correlación positiva con el pHox bajo un modelo exponencial. Se encontró que el 75 % de las muestras caracterizadas presentó reacción al peróxido con pHox menores a 3,0 identificando presencia de sulfuros de hierro en algún grado, con una mayor reacción para suelos de pH en agua mayores a 4,0 (SSA potenciales).

Los SSA actuales (evolucionados) no son reactivos, porque ya han sufrido un proceso acelerado de oxidación y acidificación; en esta clase de suelos se identifican los horizontes sulfúricos con pH menores a 3,5. En contraste, los SSA potenciales (inmaduros) son reactivos y pueden generar reacciones de oxidación y acidificación mediante la exposición de materiales sulfídicos.

Se pueden evidenciar, en menor grado, horizontes de SSA potenciales o SSA de evolución media, con pH en agua entre 4-6, horizontes minerales Cg comunes de los *Typic Sulfosaprists*, y horizontes Og de los *Typic Sulfihemists* que presentan una reacción al peróxido con pH menores a 3,0 (indicativo de materiales sulfídicos en SSA potenciales) (Tabla 4.2, Figura 4.12).

Para los SSA actuales (*Typic Sulfaquepts*, *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfohemists*), los materiales sulfídicos se encuentran generalmente debajo de un metro, lo cual sugiere que la adecuación de drenajes y obras de

ingeniería para riego no deben perturbar estos materiales, porque su oxidación generaría un impacto severo de acidificación y toxicidad al medio. De acuerdo con Hicks, (1999), Lamontagne *et al.*, (2004), Edward *et al.* (2006), en estos horizontes se encuentran materiales y minerales aún por oxidar, como sulfuros de hierro.

Los SSA actuales maduros pertenecen a horizontes Bj, Aj y Oj comunes en los *Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfaquepts*, con pH en agua menores a 4 y de reacción ultraácida al medir el pH con peróxido. En SSA fuertemente oxidados, se identifican minerales de jarosita e hidróxidos de hierro que reflejan los estados intermedios y finales de oxidación del hierro y azufre (Breemen, 1982).

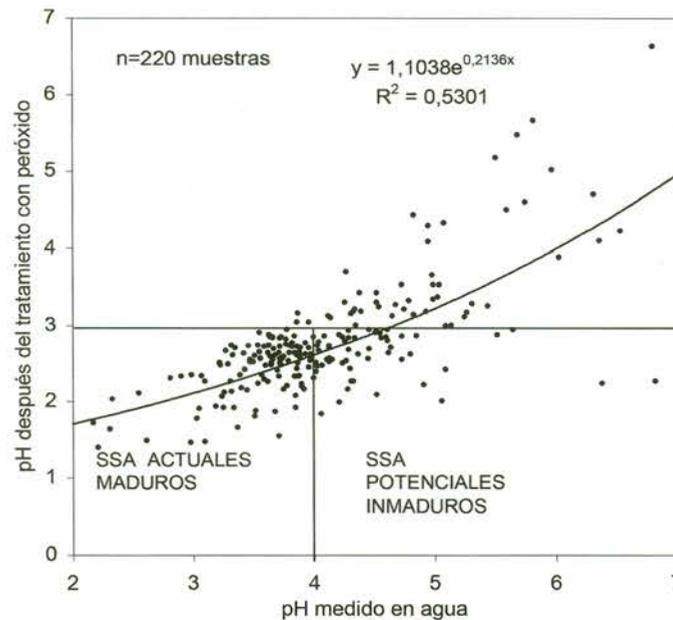


Figura 4.10 Medida del pH en agua y su relación con el pH en peróxido de hidrógeno (prueba para diagnosticar SSAP).

Fuente: Gómez (2006).

Evaluación del S total y su relación con materiales orgánicos. El S total en SSA puede indicar de manera indirecta las formas del S provenientes de los sulfuros de hierro en compuestos estables orgánicos, y en suelos minerales incluye ácidos solubles y yeso. En materiales sulfídicos de SSA, prácticamente el S total ocurre como piritita, por ello es un buen indicativo

de la presencia de sulfuros de hierro generalmente con valores mayores a 2 % (Dent & Dawson, 2000; Hicks et al., 1999; Soil Survey Staff, 2010). En los SSA estudiados existe una relación directa entre S total (%) y materiales orgánicos (Figura 4.11); azufre total mayor a 2 % corresponde a suelos orgánicos con materiales sulfídicos y valores mayores a 30 % de materia orgánica.

Dent y Pons (1995), Dent (1986), Wada y Seisuwan (1988), y Lamontagne *et al.* (2004) indican que la concentración de sulfuros producidos está relacionada con la cantidad de materia orgánica metabolizada. Además, comprobaron que los sulfuros producidos dependen de la mayor disponibilidad de materiales orgánicos descompuestos en el medio. La oxidación de la materia orgánica, en este caso, mejora el requerimiento de energía para la reducción de los sulfatos por parte de las bacterias bajo materiales sulfídicos (ecuaciones 4.1 y 4.2).

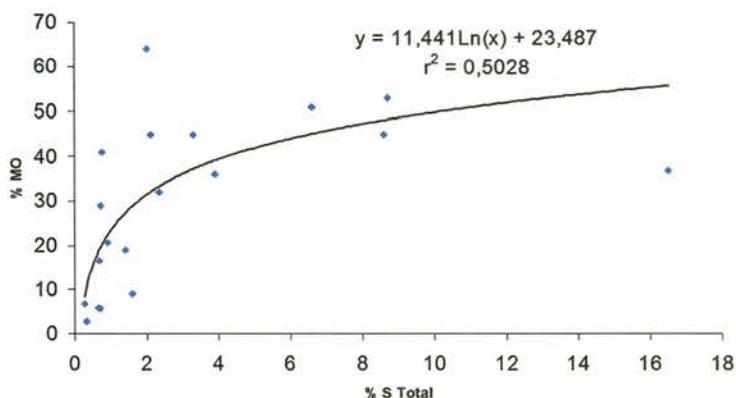


Figura 4.11 Relación entre el % S total y el % de materia orgánica en SSA. Valle alto del río Chicamocha.

Fuente: Gissat (2006).

Evaluación de las formas de hierro y su relación con la presencia de materiales sulfídicos. La presencia de Fe es una condición necesaria para la formación de materiales sulfídicos y también se asocia con la presencia de materiales orgánicos para la formación de sulfuros biológicos en medios lacustres (Wada & Seisuwan, 1988; Lamontagne *et al.*, 2004). Los suelos SSA del DRACH no son la excepción, pues los sedimentos contienen abundantes sesquióxidos de hierro y materiales orgánicos, como se discutió en los factores de formación (Gissat, 2006).

En medios anaerobios, las formas reducidas de Fe^{2+} se solubilizan dentro de un rango normal de pH y pueden ser movilizadas también por productos solubles orgánicos (Dent, 1986). Esta tendencia se ilustra en la Figura 4.12, donde el Fe se hace más soluble a medida que aumenta la materia orgánica de los suelos con valores mayores a 30 %, rango en el que se encuentran los SSA orgánicos y existe una mayor probabilidad de formarse sulfuros de hierro. De esta forma, valores de Fe soluble mayores a 10mg L^{-1} , pueden ser indicativos en medios orgánicos de su condición reducida en materiales sulfídicos.

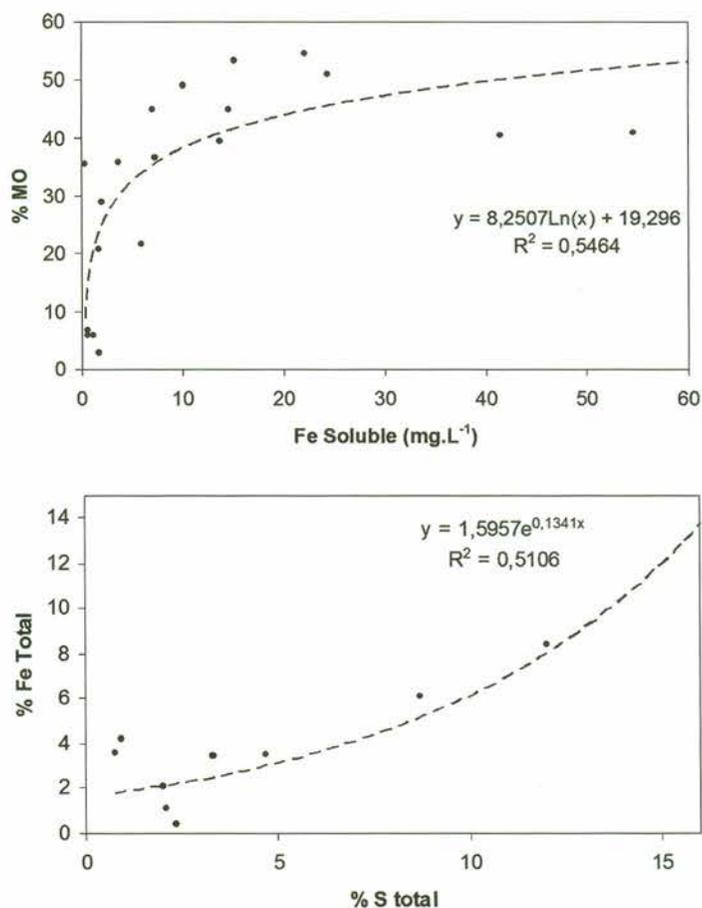


Figura 4.12 Relación entre el Fe soluble (mg L^{-1}) y porcentaje de materia orgánica (izq.). Relación entre el % S total y el % Fe total (der.). SSA orgánicos, valle alto del río Chicamocha.

Fuente: Gómez (2006).

Por otra parte, en SSA orgánicos existe una relación directa entre el S total y el Fe total (Figura 4.12), lo cual indica que el Fe en este medio se encuentra

principalmente en formas de sulfuros de hierro, cuando los niveles superan el 3 % de Fe total. Los sulfuros de hierro se localizan principalmente en las raíces fibrosas que aparecen en la rizósfera (Marius, 1982). La ausencia de sulfuros de hierro en SSA minerales se puede explicar por la mayor dinámica que ejercen formas de sesquióxidos de hierro, los cuales dominan la fracción mineral independiente de la presencia de materiales orgánicos y de azufre.

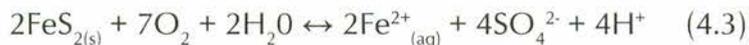
4.2.2 Sulfurización: oxidación-acidificación. El proceso de sulfurización es el fenómeno que incluye la producción de ácido sulfúrico por parte de la oxidación de sedimentos ricos en azufre y hierro, fenómeno característico de SSAA, el cual desencadena transformaciones severas de los materiales parentales afectando todas las fases del suelo (Gissat, 2006).

Los sulfuros de hierro son estables solamente bajo condiciones de reducción. La adecuación de drenajes permite las condiciones de oxidación en SSA potenciales (materiales sulfídicos) y la consecuente generación de acidez (Dent & Dawson, 2000; Ahern et al., 2004; Edward, 2006; Chuxia, 2012). La acidez potencial es activada en materiales sulfídicos cuando sufren el proceso de aireación (oxidación), desarrollándose horizontes extremadamente ácidos con pH menores a 4,0 (SSA actuales- horizontes sulfúricos).

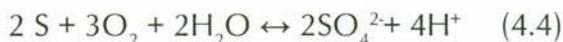
Tanto la acidez actual como la potencial pueden ocurrir simultáneamente dentro del perfil, y coexistir generalmente características de SSAA sobre SSAP. Comúnmente, en zonas de oxidación de horizontes sulfúricos pueden existir reservas de sulfuros por oxidar, como ocurre en horizontes Bj, Oj y Ogj de los *Typic Sulfosaprists* que, a pesar de presentar pH <3,5, el S total es cercano o mayor a 2 %.

En principio, la oxidación de los materiales es de origen químico y luego bioquímico, catalizados por la acción de ferrosulfobacterias litotróficas, tales como, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans* (Erlhich, 1990; Ludwig et al., 1999), lo que genera diversos productos de la acidez (ácido sulfúrico, jarosita, metales tóxicos en solución) en medios extremadamente ácidos (pH<3,5), y restringe severamente la fertilidad y el establecimiento normal de cultivos (Chuxia, 2012).

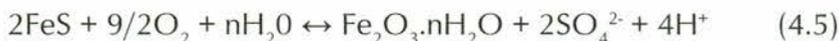
Inicialmente, la disolución del oxígeno y la conversión de sulfuros de hierro o piritas a iones ferrosos y sulfatos, constituyen reacciones lentas que se suceden bajo suelos de reacción moderada a fuertemente ácida:



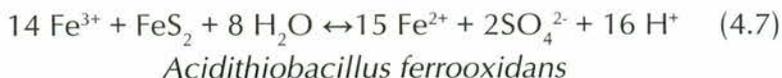
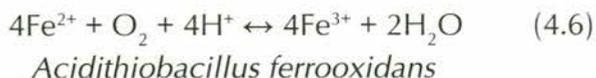
La oxidación del azufre elemental es muy lenta y produce ácido sulfúrico, pero puede ser catalizada por bacterias autótrofas en medios ligeramente ácidos:



La acidificación inicial puede oxidar monosulfuros de hierro, fenómeno característico para SSA orgánicos que presentan horizontes Og, donde las cantidades de FeS son dominantes (Gómez, 2006).



Una vez el pH del sistema oxidado es menor a 4,0, el Fe³⁺ es soluble y conlleva una oxidación rápida de los sulfuros de hierro o pirita. Esta reacción se considera de ciclopropagación del Fe y es catalizada por bacterias oxidantes de S y Fe (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) que trabajan en este medio acelerando los procesos de acidificación:



Durante la estación seca, el oxígeno se difunde en los poros y fisuras del suelo, y los iones de Fe²⁺ (ferroso) en solución son oxidados a Fe³⁺ (férrico) formando hidróxidos. En medios muy fuertemente ácidos a ultraácidos, el hierro férrico permanece en solución, luego se difunde a zonas donde está la pirita (matriz del suelo) y es reducido a Fe²⁺, el cual se difunde a la zona de oxidación y genera más acidez, de acuerdo con la Ecuación 4.7, que explica procesos de ciclopropagación.

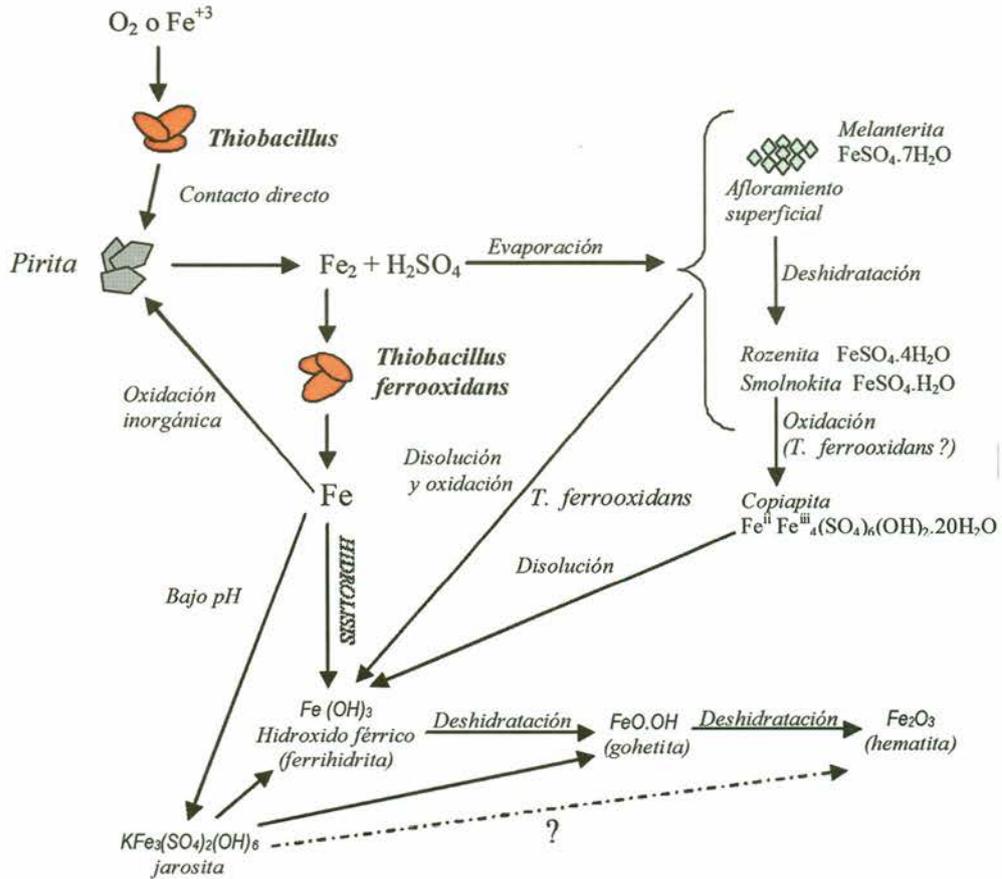


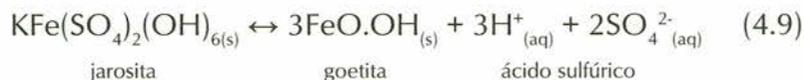
Figura 4.13 Secuencia de reacción de minerales en SSA por efectos de la oxidación de pirita.

Fuente: Nordstrom (1982).

Generalmente predomina la forma potasio-jarosita, pero se puede presentar en los suelos junto a formas de natio-jarosita e hidronio-jarosita, donde el Na^+ y el H^+ reemplazan al K^+ .

La jarosita también es gradualmente transformada a hidróxidos de hierro (Ecuación 4.9), que forman moteados marrones rojizos cuando el pH aumenta por condiciones temporales redox de saturación de agua, debido al intercambio de electrones del hierro que son más reversibles que los de azufre (Dent & Dawson, 2000; Hinrich et al., 2001; Zhang & Luo, 2002; Burton et al., 2006).

La inestabilidad e hidrólisis de la jarosita se consigue con pH superiores a 3,6, lo cual provoca una transformación gradual a sesquióxidos de Fe (ferrihidrita, goetita o hematita), indicativo de una mayor evolución en los procesos de oxidación y transformación de minerales de hierro. Las formas de sulfatos que se originan en esta reacción son susceptibles de lixiviación, formando horizontes Bgj y Bwg más evolucionados (Breemen, 1982; Dent; 1986).



En SSA del valle alto del Chicamocha, la formación de la jarosita (mineral de color amarillo ocre dorado) se observa como característica morfogenética en campo (Figura 4.14). En el análisis de sección delgada, la jarosita aparece como rellenos o recubrimientos en forma de betas amarillas pálidas contrastantes en horizontes sulfúricos Bj (*Typic Sulfosaprists*) con pH menores a 3,5 y Eh mayores a 400 mV (Figura 4.27).



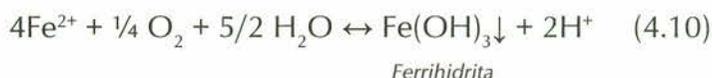
Figura 4.14 Jarosita como rasgo morfogenético en campo. SSAA oxidados. Valle alto del río Chicamocha, Boyacá.

Fuente: Gissat (2006).

Trabajos realizados acerca de la formación de hidroxisulfatos tipo jarositas (Breemen, 1973, Fitzpatrick et al., 2002) o de formas del grupo de la alunita, han mostrado preferencia por el Fe sobre el Al, y del K sobre los demás cationes (H^+ , K^+ , Na^+). Breemen (1976) encontró que aun cuando las concentraciones de Na^+ son altas, la afinidad es mayor por K^+ . Se pueden definir otras formas de hidroxisulfuros en el suelo, cuando las concentraciones de K^+ son muy bajas, como es el caso de la formación

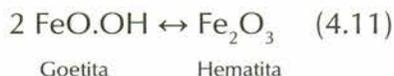
de H-jarosita, la cual fue especiada en horizontes orgánicos Oj con bajos contenidos de K⁺ comunes en los *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists* de estudio.

Actividad del hierro. Según Edward *et al.* (2006), gran parte de la acidez generada por la oxidación de la pirita depende de la oxidación de formas de Fe II a Fe III (Ecuación 4.7) y posterior formación de precipitados de hidróxidos de Fe III (ferrihidrita) y óxidos de hierro (gohetita). La constitución de estos minerales se produce a pH mayor a 4,0. La actividad de la oxidación de sulfuros de hierro favorece la aparición de los óxidos de Fe III coloidales en aguas de drenaje o suelo (Ecuación 4.10).



La formación de ferrihidrita e hidróxidos de hierro de tipo amorfo está relacionada con medios húmedos, presencia de materiales orgánicos, productos iniciales de alteración bajo actividad de microorganismos y concentraciones de Fe en solución, características que coinciden con la formación de los suelos de estudio.

Las características redoximórficas de colores rojizos a pardo rojizos en SSA de estudio, son principalmente formas libres de óxidos y de hidróxidos de hierro amorfo y ferrihidrita (Tabla 4.3), que están asociadas a la jarosita, como se evidencia en las observaciones morfogenéticas y en los análisis micromorfológicos de horizontes Bgj y Bwg de los *Typic Sulfaquepts* y *Sulfic Endoaquepts* (Figuras 4.30 y 4.31).



En los SSA minerales de estudio, la mayor evolución la representan los *Sulfic Endoaquepts* con un dominio mayor de minerales de óxidos e hidróxidos de hierro. Además, las características morfogenéticas son corroboradas por el análisis mineralógico de las arenas y la presencia de minerales opacos en un 94 % de la fracción arenosa, en forma de nódulos finos masivos de Fe

con diferentes estados de oxidación e hidratación, posiblemente formas de goetita y hematita (Ecuación 4.11).

De acuerdo con la caracterización química de los análisis especiales de Fe (Tabla 4.3), se observa un predominio de minerales amorfos (Feox) sobre los cristalinos (Fed-Feox), en todos los horizontes de perfiles pedogenéticos sulfatados ácidos, donde las formas de hidróxidos de Fe amorfo, como la ferrihidrita, son frecuentes a excepción del horizonte Bj de los *Typic Sulfosaprists*, quizás por la formación definida y abundante de jarosita principalmente en este tipo de horizontes.

Tabla 4.3 Análisis químicos especiales para estimar diversas formas de hierro (Fe).

PERFIL	HZTE	Espesor cm	%Fep	%Fed	%Feox	% Fe total	%MO	Fed-Feox
<i>Sulfic Endoaquepts</i>	A	0-10	0.69	1.20	0.75	2.50	19.12	0.45
	Bwg	10-55	0.25	2.10	1.10	3.30	2.85	1.00
	Bgj	55-80	0.44	2.90	1.30	3.90	6.79	1.60
	Oeg	80-110x	0.69	0.74	0.54	2.20	51.00	0.20
<i>Typic Sulfaquepts</i>	Ap	0-12	0.74	1.40	1.20	2.80	16.60	0.20
	Bwg	12-30	0.60	1.80	1.20	2.80	5.90	0.60
	Bgj	30-70	0.64	1.70	1.50	4.20	5.85	0.20
	Oe	70-110x	0.30	0.19	0.18	1.30	36.00	0.01
<i>Typic Sulfosaprists</i>	Aj	0-15	2.50	4.60	2.70	7.50	29.00	1.90
	Oaj	15-35	2.30	4.90	2.60	7.20	53.00	2.30
	Bj	35-60	0.97	3.90	0.60	8.40	9.18	3.30
	Ogy	60-100	0.24	0.26	0.25	1.13	45.00	0.01
<i>Typic Sulfohemists</i>	A/Oa	0-10	1.40	2.70	1.50	4.20	20.70	1.20
	Oa/Oe	10-37	1.70	3.00	2.40	4.80	41.00	0.60
	Oe	37-60	1.10	2.20	1.60	3.40	45.00	0.60
	Oig	60-100x	0.59	0.16	0.15	2.10	64.00	0.01
<i>Typic Sulfihemists</i>	Oay	0-25	1.10	2.40	1.60	3.50	45.00	0.80
	Oey	25-70	0.31	0.25	0.09	0.60	32.00	0.16
	Oeg	70-110x	1.60	2.50	1.20	14.50	36.72	1.30

Fep (pirofosfato, complejos orgánicos). Fed [ditionito-citrato, formas libres óxidos e hidróxidos de hierro (amorfas + cristalinas)]. Feox (oxalato, formas amorfas de Fe, hidróxidos de hierro amorfos).

Fed-Feox (estima formas cristalinas, goetita, hematita).

Fuente: Gissat (2006).

Otra especie importante del Fe en SSA es la presencia de formas quelatadas del Fe (Fep), principalmente para horizontes orgánicos o enriquecidos en materia orgánica como los Aj de los *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists*.

Este parámetro muestra valores similares a los de especies amorfas (Feox), lo cual indica que estos suelos están dominados por minerales amorfos y complejos metálicos orgánicos.

Hidrólisis y actividad del aluminio. En medios ácidos las bases intercambiables son removidas y reemplazadas por H^+ , pero se ha comprobado que en estos medios extremadamente ácidos las superficies de las arcillas se encuentran saturadas principalmente por aluminio (Bloomfield & Coulter, 1973).

Frink (1972) y Gómez *et al.* (2005) han demostrado en investigaciones realizadas sobre la dinámica química en SSA, que el Al^{3+} en SSA actuales se presenta como el ión dominante a pH menores de 3,5. La fuente del Al^{3+} intercambiable son las capas de silicatos intemperizadas de las arcillas. Esos silicatos son atacados por ácido sulfúrico y aumentan considerablemente el Al^{3+} en la solución.

En medios sulfatados ácidos, como ocurre en los SSA bajo estudio, existe un alto intemperismo de los minerales silicatados, debido al dominio de caolinita en la fracción fina y a la disolución de Al^{3+} y Si^{4+} en medios ultraácidos (Gómez, 2006); en el campo, los pH de horizontes sulfúricos se encuentran en un rango entre 3,2 y 3,8. El fenómeno de la pérdida de Si^{4+} y Al^{3+} de la fase sólida se constata en el análisis de aguas freáticas de los perfiles modales (sección 4.1.3), donde se observa que a pH menores de 3,5, se manifiesta un aumento en la solubilidad de estas formas, propiedad que identifica la intemperización en medios ácidos de los silicatos y su solubilidad en drenajes.

El aluminio en solución está directamente relacionado con la acidez presentada a pH menores de 3,5 en horizontes sulfúricos de los *Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfaquepts* (Figura 4.15). En este rango de pH se presentan niveles de aluminio soluble mayores a 25 mg L^{-1} y una saturación mayor al 60 %, valor crítico para la mayoría de plantas cultivables en SSA (Bloomfield & Coulter, 1973; Dent, 1986; Chuxia Lin, 2012), y se hace insoluble al aumentar el pH de 4,5 a 5,5, con valores menores a 1 mg L^{-1} . Lo anterior se debe a que el aluminio es inestable en

este medio ($\text{pH} < 3.6$) y es precipitado como gibsita en horizontes órgano-minerales (*Sulfic Endoaquepts*) asociados a sulfatos metálicos como jurbanita (Bibi, 2012), con mayor frecuencia en suelos orgánicos (*Typic Sulfihemists*), lo cual contrasta con otros suelos ácidos del trópico como oxisoles, donde el aluminio se precipita con pH mayores a 5,5.

Para horizontes orgánicos en SSA, existe una relación estrecha entre el Al^{3+} soluble y la materia orgánica (Figura 4.15), con una mayor solubilidad y toxicidad en materiales orgánicos sulfatados que en horizontes minerales. Esto se debe a que la materia orgánica forma complejos con el Al^{3+} , producto del intemperismo de silicatos de la fracción mineral.

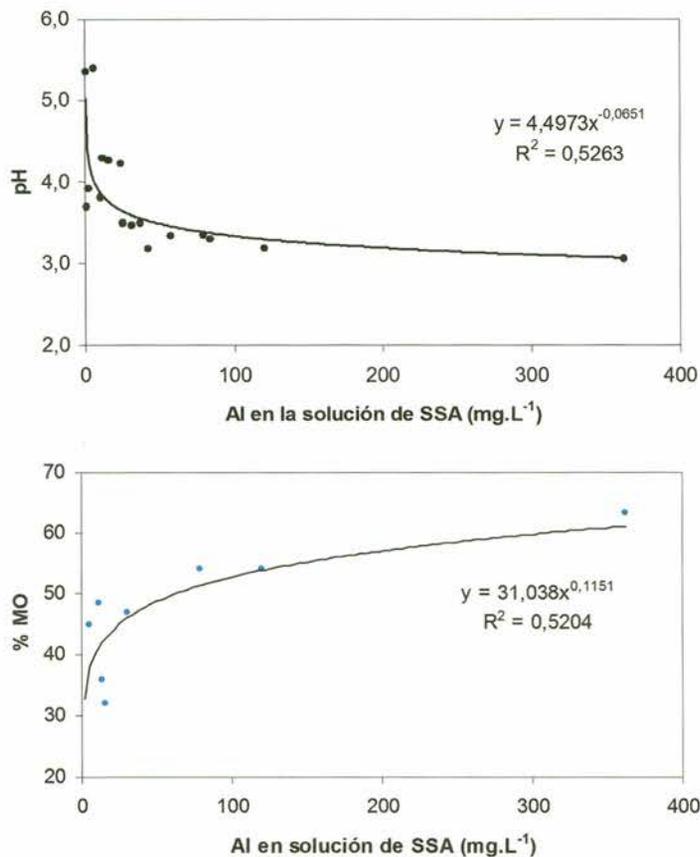


Figura 4.15 Relaciones entre el pH y las concentraciones de Al soluble (mg L^{-1}) en muestras de SSA actuales del valle alto del río Chicamocha (arriba). Relación entre la materia orgánica y las concentraciones de Al soluble (mgL^{-1}) en muestras de horizontes sulfúricos orgánicos (abajo).

Fuente: Gómez (2006).

Al caracterizar el Al³⁺ extraído con oxalato (especies amorfas) se observa un predominio sobre las formas cristalinas (analizadas con ditionito en los horizontes de SSA) (Tabla 4.4), lo cual demuestra una fuerte presencia de complejos aluminicos que no permiten la cristalización por los fuertes fenómenos de acidificación.

Tabla 4.4 Análisis químicos especiales para estimar diversas formas de Aluminio (Al).

PERFIL	HZTE	Espesor (cm)	%Alp	%Ald	%Alox	% Al total	%MO	Ald-Alox
<i>Sulfic Endoaquepts</i>	Ap	0-10	0.11	0.26	0.21	19.90	19.12	0.05
	Bwg	10-55	0.12	0.28	0.18	8.80	2.85	0.1
	Bgj	55-80	0.22	0.27	0.16	15.80	6.79	0.11
	Oeg	80-110x	0.59	0.72	0.45	21.40	51.00	0.27
<i>Typic Sulfaquepts</i>	Ap	0-12	0.38	0.38	0.29	22.30	16.60	0.09
	Bwg	12-30	0.74	0.32	0.27	18.60	5.90	0.05
	Bgj	30-70	0.68	0.27	0.24	20.50	5.85	0.03
	Oe	70-110x	0.86	0.74	0.64	19.90	36.00	0.1
<i>Typic Sulfosaprists</i>	Aj	0-15	0.38	0.43	0.21	19.70	29.00	0.22
	Oaj	15-35	0.15	0.32	0.13	16.60	53.00	0.19
	Bj	35-60	0.68	0.41	0.14	24.30	9.18	0.27
	Ogy	60-100	0.99	3.3	1.3	4.550	45.00	2
<i>Typic Sulfohemists</i>	A/Oa	0-10	0.56	0.86	0.51	24.90	20.70	0.35
	Oa/Oe	10-37	0.51	0.98	0.55	19.00	41.00	0.43
	Oe	37-60	0.61	0.97	0.56	10.50	45.00	0.41
	Oig	60-100	0.3	1.2	0.29	19.86	64.00	0.91
<i>Typic Sulfihemists</i>	Oay	0-25	0.31	0.41	0.26	20.70	45.00	0.15
	Oey	25-70	1.8	2.5	0.77	30.60	32.00	1.73
	Oeg	70-110x	0.35	1	0.34	25.30	36.72	0.66

Alp (Pirofosfato-complejos orgánicos). Ald [Ditionito-Citrato, formas libres de hidróxidos de Al (amorfas + cristalinas)]. Alox (Oxalato, formas amorfas de Al, hidróxidos de aluminio amorfos).

Ald-Alox (Estima formas cristalinas).

Fuente: Gissat (2006).

De otra parte, el aluminio extraído con pirofosfato es mayor que el de especies amorfas y muestra una relación proporcional con los contenidos de materia orgánica bajo un modelo potencial (Figura 4.16, Tabla 4.4), lo cual indica que es común encontrar formas quelatadas de aluminio en los SSA de estudio, y, por ende, la liberación de formas solubles a medida que se acidifican los horizontes sulfúricos orgánicos.

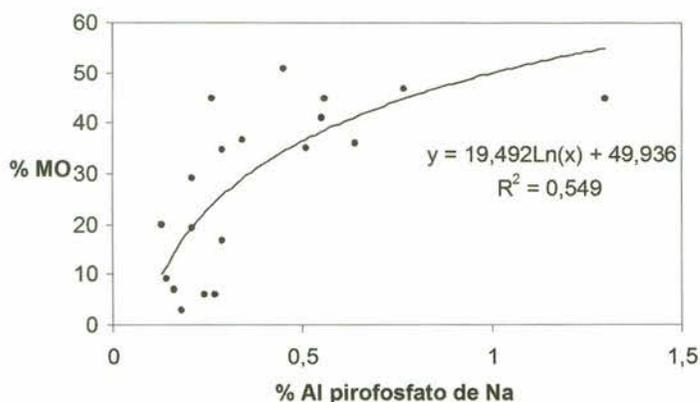
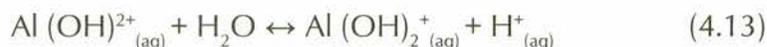
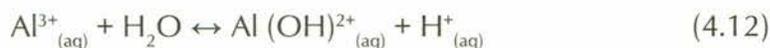


Figura 4.16 Relación entre la materia orgánica y Al pirofosfato en SSA del valle alto del río Chicamocha.
Fuente: Gómez (2006).

El aluminio intercambiable juega un papel importante en la expresión de características físico-químicas en el suelo y su efecto tóxico sobre plantas. En este sentido, la hidrólisis del aluminio es una fuente de acidez con efectos tóxicos adicionales, debido a las formas monoméricas y el Al^{3+} en solución:



En el área de estudio, Gómez (2006) comprobó que en medios ultraácidos, como sucede en SSA, la actividad del aluminio es controlada por su forma iónica (Al^{3+}) y este se puede precipitar por hidrólisis como gibsita- $Al(OH)_3$ a $pH > 5,5$ en SSA minerales y $pH > 4,5$ en SSA orgánicos (*Typic Sulfihemist*). Los resultados anteriores facilitan la interpretación y manejo de la acidez a través del encalamiento, el cual debe propender a neutralizar el aluminio a un pH alrededor de 5,0 (Figura 4.17).

El aluminio, además, en SSA forma sales sulfatadas moderadamente solubles, como la basaluminita identificada por Breemen (1982), (Ecuación 4.15) o la jurbanita (Ecuación 4.16) (Ludwig et al., 1999), minerales que pueden hidrolizarse y liberar ácido sulfúrico (acidez retenida), (Ahern et al., 2004):

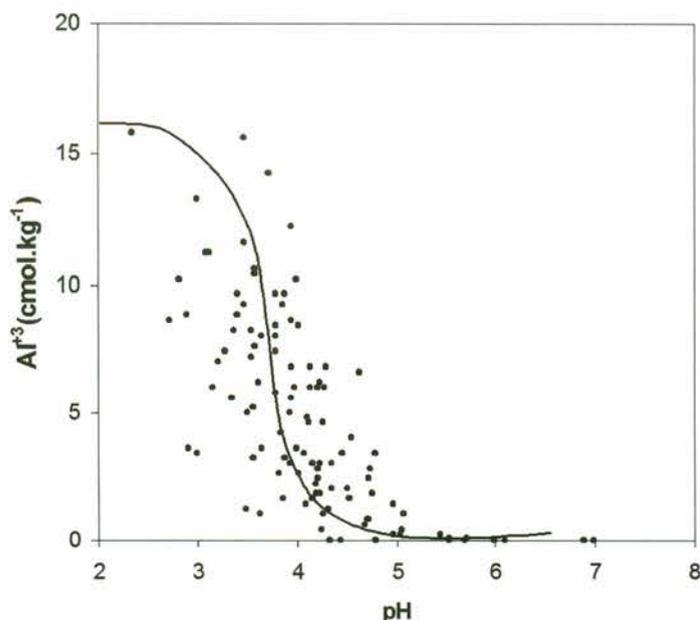
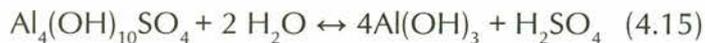


Figura 4.17 Relación del pH y la solubilidad del aluminio de cambio (Al^{3+}), en horizontes diagnósticos de SSA actuales. Valle alto del Chicamocha, Boyacá.

Fuente: Gissat (2006).

La jurbanita y basalumita representan procesos fuertes de acidez y se relacionan con horizontes sulfúricos minerales (Aj, Bj, Bgj). En los SSA actuales, la CIC es dependiente del pH y es dominada por el aluminio de cambio y la materia orgánica. La presencia de la acidez intercambiable en SSA del Distrito de Riego está determinada principalmente por el Al^{3+} con abundancia de formas extremadamente tóxicas y valores hasta de $15 \text{ Cmol}^{(+)}\text{kg}^{-1}$ presentes a pH menores a 3.5, como se observa en la Figura 4.17, rango que correlaciona con las mayores concentraciones del aluminio soluble, como se ilustró en la figura 4.15.

Sulfatos y salinidad. Además de la jarosita, los sulfatos de sodio, magnesio, calcio, aluminio y hierro constituyen sales solubles producto de la acidez en SSA (Ahern, 2004; Bibi, 2012). Lo anterior coincide con las formas de sales sulfatadas determinadas en el área de estudio (Tabla 4.7).

Los sulfatos de magnesio y sodio son rápidamente lavados en el perfil, tan pronto se adecuan los drenajes. Los sulfatos de calcio son menos solubles, pero se pueden solubilizar en algún grado por efecto de épocas húmedas en medios ácidos. Bajo fuertes condiciones de evaporación pueden aparecer sulfatos de aluminio precipitados en superficie (Rosikcy et al., 2003; Fitzpatrick et al., 2012).

En medios oxidados, gran parte del azufre movilizado como pares iónicos de sulfatos, se lixivian en el agua de infiltración o drenaje y permanecen en la fase soluble del suelo, como producto de los procesos de oxidación; solo una pequeña cantidad de sulfatos es retenida en la fracción mineral como la jarosita (Dent, 1986; Edward et al., 2006), siendo la mayor retención de S en suelos minerales que en los orgánicos. Lo anterior se comprueba por las mayores concentraciones de sulfato soluble en horizontes orgánicos comparados con suelos minerales (Tabla 4.6). Este aumento se debe a una mayor acumulación de formas de azufre en medios reducidos orgánicos, es decir, SSA potenciales orgánicos, los cuales presentan niveles mayores a 2000 mg L⁻¹ de SO₄²⁻ soluble, tal como se caracterizó en los *Typic Sulfihemists* y horizontes reducidos profundos (Tabla 4.6).

La mayoría del sulfato soluble se pierde en las aguas de drenaje y se difunde subsuperficialmente a substratos para ser reducido y formar nuevamente sulfuros, así perdura el ciclo del proceso de sulfhidrización en medios sulfatados ácidos (Dent, 1986; Jusop & Muhrral, 2002; Bibi, 2012).

Además, se comprobó en los SSA de estudio, que el agua en solución es rica en sulfatos, y que estas formas se difunden a través del suelo en forma iónica o formando pares iónicos de Ca, Mg, Na, Fe y Al. Las sales de Fe y Al que se forman en SSA pueden concentrarse en la superficie por evaporación, limitando el desarrollo de cultivos, como se observa en los *Typic Sulfihemists* de la fase salina sódica en el sector Las Vueltas con afloramientos salinos sódicos y metálicos (Figura 4.18).

El fenómeno de salinidad en SSA se debe principalmente a la fluctuación de niveles freáticos ricos en sulfatos, asociada con sales sódicas, magnésicas y metálicas (Tabla 4.7). Otra causa del incremento de sales se presenta cuando

los SSA son drenados, debido a la generación de sales sulfatadas provenientes de las reacciones de oxidación de sulfuros en horizontes profundos reducidos. Para SSA salinos, los valores de CE pueden exceder los $10\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Dent, 1986), valores que se registran en los SSA del Distrito y que causan detrimento en el crecimiento de los cultivos (Tabla 4.6) (Gissat, 2006).



Figura 4.18 Afloramiento de sales sulfatadas metálicas en épocas secas, *Typic Sulfohemists*. Sector Las Vueltas.

Fuente: Gissat (2006).

En las áreas escaldadas ultraácidas de los *Typic Sulfohemists* se observan afloramientos rojizos superficiales, los cuales constituyen capas de baja permeabilidad, probablemente integradas por sulfatos de hierro que se forman bajo condiciones sulfatadas ácidas del tipo Schwertmannita (Burton et al., 2006).

Para los SSA de estudio, existe una correlación significativa ($>0,93$) entre los sulfatos solubles y la salinidad (CE dSm^{-1}) (Figura 4.20, Tabla 4.6), tendencia que comprueba el dominio de sales sulfatadas ácidas, la cual permite

estimar de manera práctica y aproximada la concentración de sulfatos en solución a partir de la CE (dS m^{-1}) mediante la Ecuación 4.17, deducida de la Figura 4.20.

$$\text{SO}_4^{2-} \text{ soluble (mg L}^{-1}\text{)} = \text{CE (dS m}^{-1}\text{)} \cdot 500 \quad (4.17)$$



Figura 4.19 Afloramiento de sales de hierro en SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Fuente: Gissat (2006)

La estimación indirecta de los sulfatos permite diagnosticar condiciones de sulfatación cuando los niveles de sulfato soluble son mayores a 500 mg kg^{-1} con CE mayores de 1 dS m^{-1} ; bajo estas condiciones se pueden presentar limitaciones agrícolas en suelos sulfatados ácidos.

Los sulfatos solubles también se pueden estimar a través del azufre del suelo (método del fosfato de Ca $0,008\text{M}$), dado que presenta una relación lineal directa con las formas solubles de S (extracto de saturación, turbidimetría); indicador práctico si se parte del hecho que los análisis químicos de caracterización son los más comunes (Figura 4.21).

$$\text{SO}_4^{2-} \text{ soluble (mg L}^{-1}\text{)} = 1.43 \cdot (\text{S extractable (mg kg}^{-1}\text{)} - 7.71) \quad (4.18)$$

Bajo este modelo, los valores de azufre extractable mayores a 350 mg L^{-1} identifican condiciones sulfatadas ácidas, lo que coincide con sulfatos en solución mayores a 500 mg L^{-1} , nivel que indica la presencia de horizontes

diagnósticos sulfatados de acuerdo con parámetros de Dent (1986) y Soil Survey Staff (2010).

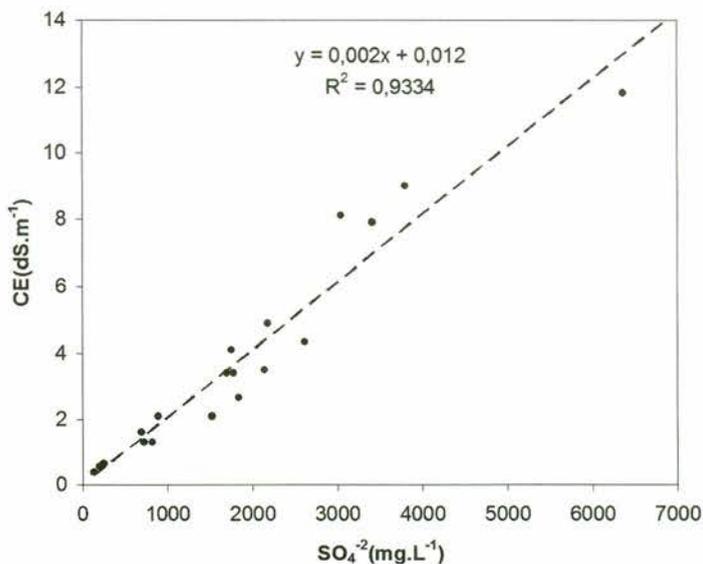


Figura 4.20 Relación entre la salinidad y los sulfatos solubles en SS del valle alto del río Chicamocha, Boyacá.

Fuente: Gómez (2006).

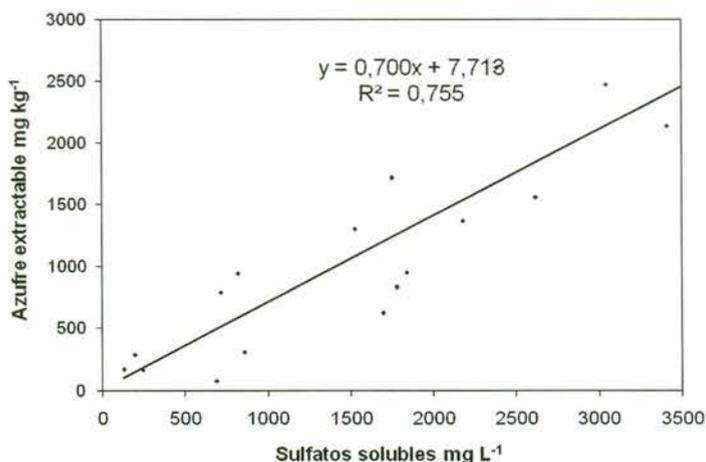


Figura 4.21 Relación entre el azufre extractable del suelo (mg kg⁻¹) y el sulfato soluble (mgL⁻¹), en SSA del valle alto del río Chicamocha, Boyacá.

Fuente: Gómez (2006).

4.2.3 Solubilización y productos de actividad iónica específicos para SSA. Para determinar las formas solubles en la solución y los productos

de actividad iónica (PAI), se utilizó el programa de especiación PHREEQC –Versión 2- (Parkhurst, 1999). El modelo incluye iones H^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , Fe y SO_4^{2-} , que se cuantificaron mediante extracto de saturación para cada uno de los horizontes diagnósticos de los perfiles modales (Tabla 4.6). Las reacciones homogéneas en la fase soluble y su termodinámica son tomadas de la base de datos PHCREEQC (Parkhurst & Appelo, 1999) e incluye complejos Al-OH, ($Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_3^0$ y $Al(OH)_4^-$); complejos Fe-OH ($FeOH^+$, $Fe(OH)^{2+}$, $Fe(OH)_3^0$, y $Fe(OH)_4^-$; $Fe_2(OH)_2^{4+}$, $Fe_3(OH)_4^{5+}$), complejos de sulfatos de Al ($AlSO_4^+$, $Al(SO_4)_2^-$, $AlHSO_4^{2+}$); junto a complejos de sulfato de Fe ($Fe(SO_4)_2^-$, $FeHSO_4^{2+}$, $FeHSO_4^+$), sulfatos de Ca, Na y K, constante de disociación del agua y sistemas de equilibrio para el ácido sulfúrico.

Para determinar las reacciones heterogéneas y minerales secundarios específicos bajo condiciones sulfatadas ácidas, en la Tabla 4.5 se muestran los productos de solubilidad y las constantes de equilibrio necesarias para calcular los productos de actividad iónica en condiciones sulfatadas.

Como es de esperarse para este tipo de suelo, el sulfato es el anión dominante (50-70 %) (Tabla 4.6). Lo anterior se comprueba igualmente con la reacción fuerte al cloruro de bario en campo. Respecto a los pares iónicos, dominan las formas de sulfatos de Ca, a excepción de los Oj y Bj de los SSA órgano-minerales (*Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists*), donde las sales solubles que predominan son las de sulfato de aluminio ($AlSO_4^+$, log Actividad = -2,51) y el HSO_4^- (log Actividad = -3,2), que provienen de la reacción secundaria del ácido sulfúrico. La mayor distribución de estas especies se encuentra en los suelos más oxidados o acidificados con horizontes Aj, Bj, Oj (*Typic Sulfihemists*, *Typic Sulfaquept*).

En SSA potenciales (horizontes Og de los *Typic Sulfihemists*), se encuentran además formas reducidas de azufre como H_2S (log Actividad= -1,845) que dan el olor característico a gases de ácido sulfhídrico “huevo podrido”. A medida que se profundiza en los perfiles estudiados, las concentraciones de sulfatos se incrementan debido al contacto directo con el nivel freático cargado con estas sales y a las formas reducidas en horizontes anegados.

Tabla 4.5 Productos de solubilidad y constantes de equilibrio (25°C) necesarios para calcular los productos de actividad iónica (PAI) en SSA

REACCION		logK _i ^a	MINERAL SECUNDARIO	
Ca ⁺² + SO ₄ ²⁻ + 2H ₂ O	⇌	CaSO ₄ · 2H ₂ O	-4.638 ^b	Yeso
Al ⁺³ + SO ₄ ²⁻ + H ₂ O	⇌	AlOHSO ₄ + H ⁺	-3.23 ^c -3.80 ^d	Jurbanita
Al ⁺³ + 3 H ₂ O	⇌	Al(OH) ₃ + 3H ⁺	9.66 ^b	Al(OH) ₃ amorfo
Al ⁺³ + 3 H ₂ O	⇌	Al(OH) ₃ + 3H ⁺	8.04 ^b	Gibbsite
3Fe ⁺³ + 2SO ₄ ²⁻ + 7H ₂ O	⇌	(H ₃ O)Fe(SO ₄) ₂ (OH) ₆ + 5H ⁺	-5.39 ^e	H-jarosita
K ⁺ + 3Fe ⁺³ + 2 SO ₄ ²⁻ + 6H ₂ O	⇌	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ + 6H ⁺	-9.21 ^e	K-jarosita
Fe ⁺³ + 12/5 H ₂ O	⇌	1/5(Fe ₅ O ₇ (OH) · 4H ₂ O + 3H	5.00 ^f	Ferrihidrita
Fe ⁺³ + 3 H ₂ O	⇌	Fe(OH) ₃ + 3H ⁺	3.54 ^b	Fe(OH) ₃ amorfo
Fe ⁺³ + 2 H ₂ O	⇌	FeO(OH) + 3H ⁺	1.39 ^b	Lepidocrocita
4Al ⁺³ + SO ₄ ²⁻ + 11H ₂ O	⇌	Al ₄ (SO ₄)(OH) ₁₀ · H ₂ O + 10H ⁺	24 ^d	Basaluminita amorfo
K ⁺ + 3Al ⁺³ + 2 SO ₄ ²⁻ + 6H ₂ O	⇌	KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ + 6H ⁺	-1.4 ^g	Alunita
Fe ⁺³ + SO ₄ ²⁻ + 7H ₂ O	⇌	Fe(SO ₄) · 7H ₂ O	-2.46 ^b	Melanterita
Fe ⁺³ + SO ₄ ²⁻ + 7H ₂ O	⇌	Fe(SO ₄)(OH) · 5H ₂ O + H ⁺	-10.06 ^h	
8Fe ⁺³ + SO ₄ ²⁻ + 14H ₂ O	⇌	Fe ₈ O ₈ (OH) ₆ SO ₄ + 22H ⁺	-18 ⁱ	Schwertmannita

^a Constantes de equilibrio para 25°C.

Fuente: ^bLindsay (1979); ^cVan Breemen (1973); ^dNordstrom (1982); ^eBall & Nordstrom (1991); ^fBigham (1996); ^gParkhurst (1999); ^hSullivan et al. (1988^a), referenciados por Ludwig et al. (1999).

Las concentraciones de Al³⁺ incrementan notoriamente cuando las bases son bajas en la solución, como en horizontes Oj de los *Typic Sulfohemists* con la siguiente relación (Tabla 4.7): Al>Ca>Mg>K>Na, lo cual demuestra que la oxidación de este tipo de suelos no es compensada por minerales que presenten cationes básicos en su estructura y consecuentemente se presenta un mayor proceso de acidificación y desilificación que en SSA minerales. Este fenómeno se relaciona con el incremento en las concentraciones de Si soluble (Tabla 4.6) en el suelo y en aguas freáticas.

Las altas concentraciones del Al³⁺ soluble (3 a 13 Cmol⁽⁺⁾ L⁻¹) se presentan principalmente como sulfatos de AlSO₄⁺ y Al³⁺ libres en solución (Tabla 4.7) que incrementan aún más la acidificación por los productos de hidrólisis (Ludwig, et al., 1999), lo que repercute en los efectos tóxicos. Por eso, en suelos de mayor concentración álica, como en los *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists*, aparecen áreas escaldadas por efecto de la degradación química en horizontes superficiales.

Respecto a los cationes solubles, las formas iónicas más comunes son $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Al}$, en Bwg (*Sulfic Endoaquepts*) y $\text{Ca} > \text{Al} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$ en Bgj de los *Typic Sulfaquepts*, (Tabla 4.6), mientras que en horizontes Og de los *Typic Sulfihemists* u Og subsuperficiales del piso lacustre, se presenta la siguiente relación $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$, con una tendencia a ser SSA salinos sódicos. Los cationes forman sus respectivos pares iónicos con el anión sulfato y favorecen el proceso de neutralización de estos horizontes (Gómez, 2006; Bibi, 2012). La mayor distribución y concentración de cationes básicos en la fase soluble de los *Sulfic Endoaquepts* representa un menor impacto de los procesos de sulfatación, que se ve reflejado en áreas recuperadas y aptas para cultivos.

Los *Sulfic Endoaquepts* son suelos menos afectados por condiciones sulfatadas ácidas, que presentan las menores concentraciones de aluminio extractable con presencia de precipitados amorfos de $\text{Al}(\text{OH})_3$ o gibsita ($\text{pPAI} = 8,5 - 8,9$) (Tabla 4.7). Estos minerales amorfos de $\text{Al}(\text{OH})_3$ son dominantes en horizontes orgánicos Og con pH mayores a 4,5, donde coincide con menores concentraciones de Al^{3+} soluble (Tabla 4.6). En SSA orgánicos potenciales (*Typic Sulfihemists*) y horizontes Og profundos, se observa un aumento de las formas de H^+ y Fe extractable como productos directos de los monosulfuros de Fe ($\text{pPAI} = -3,92$ a $-3,45$) (Tabla 4.7), calculados como minerales secundarios comunes en estos suelos (Jusop & Muhrral, 2002).

En SSA oxidados, los cálculos de productos de actividad iónica (PAI), han demostrado que la solubilidad del Fe es controlada por la jarosita y shwertmannita (Ludwig et al., 1999; Burton et al., 2006). La Shwertmannita ($\text{pPAI} = -18$ a $-18,5$) se calcula a partir del producto de actividad de Fe^{+3} y SO_4^{-2} en solución acuosa. Es un mineral indicativo de procesos de acidificación severa, porque genera 22 H^+ en la formación de un mol del mineral (Tabla 4.5). Este mineral generalmente se forma a pH menor a 3,3 precipitando en superficies de color rojizo naranja (Fitzpatrick et al., 2002). Este mineral secundario se especió en SSA Actuales (*Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfaquepts* y *Typic Sulfohemists*) (Tabla 4.6).

Tabla 4.6 Composición química de la fase soluble en perfiles modales de SSA.
Valle alto del río Chicamocha, Boyacá.

PERFIL SSA	Hztes	Espesor cm	pH*	CE dSm ⁻¹	Ca	Mg	K	Na	Fe	Al	SO ₄ ⁻²	Cl	Si
					mmol L ⁻¹								
Sulfic Endoaquepts	Ap	0-10	5,4	1,60	4,20	0,85	1,63	4,88	0,11	0,01	7,21	1,97	0,5
	Bwg	10-55	4,2	0,65	0,95	0,23	0,28	3,30	0,03	0,87	2,58	0,65	0,9
	Bgj	55-80	3,6	3,50	12,59	1,64	0,27	10,48	0,01	0,02	22,31	0,11	1,5
	Oeg	80-110x	4,3	4,10	2,66	1,16	1,18	28,55	0,44	1,05	18,27	7,42	1,2
Typic Sulfaquepts	Ap	0-12	3,8	0,38	0,50	0,27	0,30	1,13	0,25	0,07	1,36	0,01	0,9
	Bwg	12-30	3,81	0,56	1,17	0,26	0,20	0,88	0,01	0,37	2,08	0,03	2,5
	Bgj	30-70	3,50	2,66	12,96	0,81	0,06	1,30	0,02	1,36	19,16	0,02	2,5
	Oe	70-110x	3,50	4,35	9,42	4,30	0,57	13,00	0,75	0,92	27,29	4,91	1,8
Typic Sulfosaprists	Aj	0-15	3,18	2,10	2,55	1,57	0,11	6,23	0,04	1,55	9,28	0,16	3,75
	Oaj	15-35	3,00	3,40	4,47	2,87	0,05	10,75	0,18	1,15	17,69	3,90	3,75
	Bjb	35-60	3,34	3,40	5,06	3,55	0,23	10,93	0,27	3,12	18,57	3,25	2,5
	Ogy	60-100	3,76	9,8	10,55	11,25	1,60	40,30	0,61	0,02	31,70	0,00	3,75
Typic Sulfohemists	A/Oa	0-10	3,4	1,30	1,87	0,32	0,13	1,00	0,03	3,09	7,49	0,02	2,2
	Oa/Oe	10-37	3,3	1,30	1,58	0,33	0,14	1,23	0,07	4,45	8,56	0,03	3,5
	Oe	37-50	3,1	2,10	1,75	0,34	0,11	1,20	0,26	2,93	15,91	0,37	3,5
	Oig	50-110	3,3	1,70	1,58	0,65	0,13	1,10	0,48	13,40	22,70	3,24	3,5
Typic Sulfihemists	Oay	0-25	3,8	7,90	11,44	6,01	3,35	39,70	0,13	0,21	35,53	18,55	0,5
	Oey	25-70	4,2	9,00	10,74	7,65	2,85	50,00	0,99	0,58	39,54	23,29	0,5
	Oeg	70-110x	6,7	11,80	6,67	12,54	3,80	89,20	0,13	0,02	66,31	33,48	0,5

*pH medido en pasta de saturación; CE cuantificada en extracto con conductivímetro.
mg L⁻¹(ppm)=masa atómica del elemento,mmol L⁻¹

Fuente: Gissat, 2006.

Otro indicador de los procesos involucrados en la formación de SSA son las aguas freáticas que guardan una relación directa con la pedogénesis del suelo. En este sentido, por ejemplo, el análisis de especies iónicas en aguas freáticas de los *Typic Sulfihemists* (sector Cucho-Vueltas) reflejó incipientes procesos de sulfatación y predominio de procesos de autoneutralización (Gómez, 2006; Bibi, 2012), por la formación de sales de sulfato de sodio y de calcio, tipo yeso y gipsita (Tabla 4.7). En contraste, en aguas freáticas de *Typic Sulfohemists* (sector Vargas-Cucho), predominan sulfatos con formación de sales metálicas de reacción ácida (AlSO₄⁺, FeSO₄⁺), factores que indican alta oxidación y degradación del medio.

A partir de los análisis de especiación de la fase soluble del suelo y aguas freáticas, también se identificó la jarosita, que caracteriza horizontes sulfúricos. De los cálculos de producción iónica se identificó jarosita en los

horizontes sulfúricos de los *Typic Sulfaquepts*, *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists*, con una clara diferencia respecto a la especie de jarosita, que evidencia el grado de evolución de los horizontes sulfúricos.

Tabla 4.7 Especies solubles y productos de actividad iónica en aguas freáticas de SSA. Valle alto del río Chicamocha.

Perfil modal	Formas iónicas solubles dominantes	Productos de actividad iónica
Typic Sulfaquepts	Iones: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Cl} > \text{Fe} > \text{Al}^{3+} > \text{Si} > \text{K}^+$ Sales: $\text{CaSO}_4 > \text{MgSO}_4 > \text{FeSO}_4^+ > \text{NaSO}_4 > \text{Al}(\text{SO}_4)^+$	$\text{Fe}(\text{OH})_3$ amorfo, yeso, jurbanita, caolinita, K-jarosita
Typic Sulfohemists	Iones: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Al}^{3+} > \text{Si} > \text{Ca}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Cl}$ Sales: $\text{AlSO}_4^+ > \text{FeSO}_4^+ > \text{Al}(\text{SO}_4)_2 > \text{CaSO}_4$	$\text{Fe}(\text{OH})_3$ amorfo, H-jarosita, jurbanita, yeso.
Typic Sulfosaprists	Iones: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Na} > \text{Cl} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Si} > \text{Al}^{3+} > \text{K}^+$ Sales: $\text{CaSO}_4 > \text{MgSO}_4 > \text{NaSO}_4 > \text{FeSO}_4^+ > \text{Al}(\text{SO}_4)_2$	Yeso, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ amorfo, K-jarosita, jurbanita.
Typic Sulfihemists	Iones: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Na} > \text{Cl} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K} > \text{Fe} > \text{Si} > \text{Al}$. Sales: $\text{NaSO}_4 > \text{MgSO}_4 > \text{CaSO}_4 > \text{KSO}_4$	Yeso, albita, gibsitita, feldespatos potásicos, cuarzo, ferrihidrita.
Sulfic Endoaquepts	Iones: $\text{Na} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Si} > \text{Fe} > \text{Al}$ Sales: $\text{NaSO}_4 > \text{CaSO}_4 > \text{MgSO}_4 > \text{KSO}_4 > \text{Al}(\text{SO}_4)^+$	Gibsitita, yeso, anhidrita, basaluminita, jurbanita.

Fuente: Gómez (2006); Gissat (2006).

En este sentido, para horizontes sulfúricos orgánicos se calculó H-jarosita (pPAI= -5,39), especie dominante bajo procesos de sulfatación extremos en ausencia de minerales cristalinos y predominio de H^+ (Ludwig, 1999). En contraste, para SSA minerales actuales es común la K-jarosita (pPAI= -9,21), lo anterior debido a que en estos suelos es mayor el K^+ soluble (Tablas 4.5 y 4.7), y de acuerdo con el PAI puede ser producto de la meteorización de las micas o feldespatos potásicos, como ocurre en Bgj de los *Typic Sulfaquepts*.

En todos los horizontes se presentaron formas de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ en estado amorfo, como se observa en la Tabla 4.7, lo cual indica productos de hidrólisis completa o incompleta de jarosita o reacción por precipitación de formas de Fe^{+3} (Breemen, 1982; Burton, 2006). En los *Sulfic Endoaquepts* se forma específicamente ferrihidrita, mineral que indica a $\text{pH} > 4,5$ la fuerte hidrólisis y transformación de jarosita ferrihidrita. Estos hidróxidos de hierro imprimen los colores rojizos característicos de las condiciones redoximórficas en este tipo de suelos que se ubican en las unidades Ministerio y Tibasosa.

Bajo procesos de autoneutralización en los *Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfaquepts* y *Typic Sulfihemists*, el yeso aparece como el mineral secundario que más controla la solubilidad del Ca^{2+} en horizontes con altas concentraciones de SO_4^{2-} y Ca^{2+} disponible (Tabla 4.7), como se deriva de los cálculos de PAI del CaSO_4 soluble donde se determinó un equilibrio para el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ($\text{pPAI} = -4,6$ a $-4,8$), mineral que se evidenció en campo y se determinó en la evaluación de la sección delgada (Figura 4.33).

La formación de este mineral secundario representa fenómenos de autoneutralización y depende del calcio intercambiable y las sales solubles de CaSO_4 que existen en el medio, fenómeno ampliamente reportado por Ludwig *et al.* (1999) y Bibi (2012).

4.2.4 Procesos redox. Otro proceso característico del estado de sulfatación de los suelos es la oxidorreducción, fenómeno que cambia drásticamente el comportamiento de los elementos en el suelo, principalmente oxígeno (O), carbono (C), nitrógeno (N), azufre (S), hierro (Fe) y manganeso (Mn), los cuales determinan en gran parte la génesis de suelos sulfatados ácidos (Hinrich *et al.*, 2001; Hicks *et al.*, 2002).

La solubilidad y formación de minerales de Fe, Al y S en SSA depende del pH y del potencial redox (Dear *et al.*, 2002; Breemen, 1982). La solubilidad del Fe y el S es controlada por reacciones redox del Fe, catalizadas por la oxidación microbial de compuestos de carbono (Zapata, 2004). Esta energía, que generan las reacciones redox en SSA, son intensificadas por el rompimiento de la molécula orgánica y el flujo fuerte de electrones que son aprovechados por parte de las bacterias reductoras de azufre y hierro para formar sulfuros de hierro estables en medios anegados con potenciales redox negativos que varían entre 0 y -220 mV (Dent & Dawson, 2000; Lamontagne *et al.*, 2004).

En contraste, cuando se oxigena el medio por prácticas de aireación (labranza y drenaje), la oxidación se incrementa y se generan valores positivos de Eh (mV), por el paso de los diferentes estados de oxidación del hierro (Fe^{+2} , Fe^{+3}) y el azufre (S^0 , SO_4^{-2}), estables en medios ácidos (Breemen, 1982; Brock, 1987; MDBA, 2011).

Relación potencial redox-Eh y acidez. Para la evaluación del potencial redox en SSA del DRACH, se hicieron 117 mediciones de pH y Eh en campo, y de Al intercambiable en el laboratorio. Los suelos muestreados en el área de la planicie fluviolacustre del valle alto del Chicamocha mantienen diferentes estados de oxidoreducción. Se tuvieron en cuenta las características redoximórficas de cada horizonte muestreado, que evidenciaban las condiciones redox y de acidificación en los suelos de estudio. En la caracterización de SSA predominan horizontes superficiales con condiciones de mayor oxidación (alto potencial redox) y en menor proporción condiciones reducidas de horizontes subsuperficiales minerales encontrados entre 0,8 y 1,5 m de profundidad.

La Figura 4.22 muestra que para SSA continentales lacustres, el potencial redox es inversamente proporcional al mayor grado de acidez. Allí se establecen modelos lineales para horizontes Bg y Og, comunes de los *Typic Sulfihemists* (SSA potenciales), donde a pH por encima de 6,0, se expresan condiciones reducidas por saturación continua de la lámina freática de horizontes subsuperficiales. En estas circunstancias, por la disolución de sulfatos y sulfuros se forman monosulfuros de hierro con pH mayores de 6,0 y Eh (mV) negativos, particularidades de materiales sulfídicos, fenómeno corroborado por Mensvoort y Quang (1988) y Lamontagne *et al.*, (2004).

Los procesos de reducción en el suelo aumentan el pH, por el consumo continuo de protones o hidrógeno; en cambio, las reacciones de oxidación disminuyen el pH, por la producción de protones que acidifican el medio, con la consecuente aparición de minerales y horizontes característicos de SSA dependientes del pH (Zapata, 2004).

Es importante notar que para horizontes Ap se presenta la misma relación entre pH versus Eh, pero bajo un modelo potencial, donde, a medida que aumenta el pH o disminuye la acidez, no se obtienen valores negativos en el potencial redox. El fenómeno anterior se explica porque estos horizontes son superficiales, con menos afectación por las condiciones ácuicas que los B y O, además están más alterados por efectos de laboreo y exposición al ambiente. Los horizontes A presentan escasas condiciones redoximórficas evidentes en campo, a excepción de horizontes con mayor materia orgánica

como los Aj, que presentan mayor impacto por la generación de extrema acidez, procesos que se expresan en áreas escaldadas y crecimiento restringido de cultivos (Gómez et al., 2005).

Evaluando el comportamiento del pH y el Eh para SSA agrupados por horizontes minerales y orgánicos, se definen dos dinámicas de oxidorreducción debido a la constitución orgánica o mineral de los materiales.

En SSA, los procesos redox ejercen una fuerte dinámica química, demostrada por la presencia de jarosita en medios ultraácidos (horizontes Bj y Bgj de los *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfaquepts* analizados). Estos horizontes sulfúricos coinciden con $Eh > 400$ y $pH < 4,0$. Cuando el pH es superior a 4,0 en horizontes Bwg de los *Sulfic Endoaquepts*, coincide con la dinámica en la formación de óxidos e hidróxidos de hierro como la ferrihidrita o goetita a Eh entre 100 y 500 mV (Breemen, 1982; Gómez, 2006).

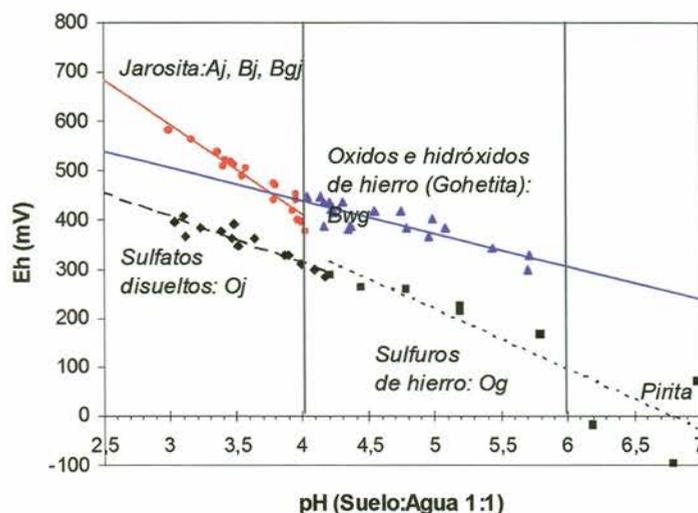


Figura 4.22 Diagrama Eh-pH en horizontes minerales y orgánicos de SSA. Valle alto del río Chicamocha. Fuente: Gómez (2006).

Los pH analizados en horizontes orgánicos (Oj) sulfúricos de los *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists*) presentan un rango entre 2,5 y 4,0 y valores de Eh entre 300 a 450 mV (Figuras 4.22, 4.23), medidos en pasta de saturación en laboratorio, valor que coincide con la lectura realizada en suelos con una humedad por encima de capacidad de campo (Figura 4.23).

Este rango concuerda con determinaciones hechas por Mensvoort y Quang (1988) para SSA con baja formación de jarosita.

De otra parte, se observa para horizontes profundos Og y Cg que el Eh varía entre 300 a -100, con pH que oscilan en un rango entre 4 a 7 (Figura 4.22). Bajo estas condiciones, se pueden formar sulfuros de hierro, como pirita, asociados a desechos orgánicos descompuestos en zonas lacustres (Breemen, 1982; Lamontagne et al., 2004).

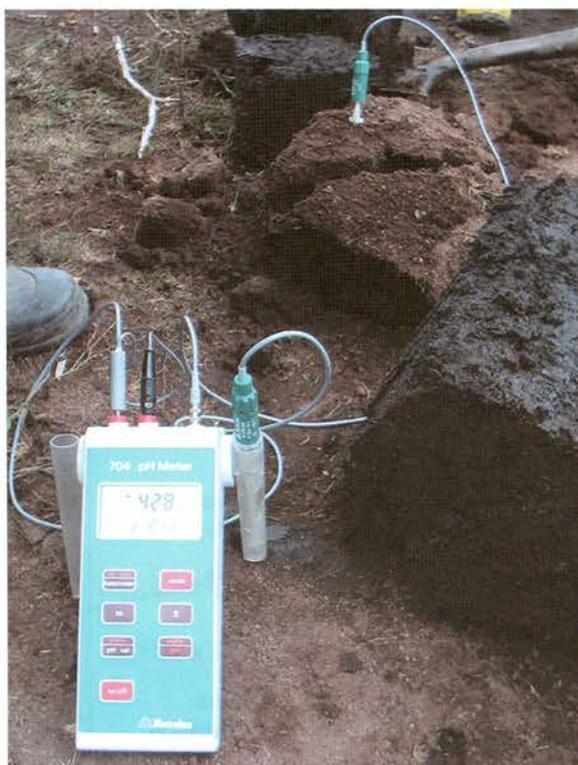


Figura 4.23 Determinación del potencial redox en campo: lectura de $Eh > 400\text{mV}$ en horizontes sulfúricos de los *Typic Sulfohemists*, esta evaluación debe hacerse con humedad del suelo cercana de punto de saturación.

Fuente: Gissat (2006).

Mensvoort y Quang (1988) concluyen que la baja formación de jarosita en SSA orgánicos es debida a la mayor constitución de materiales orgánicos, lo cual regula el potencial redox con niveles de Eh (mV) menores a 400 y Eh (mV) entre 400 a 450 para SSA con una mezcla mineral y orgánica. Bajo condiciones extremas de acidez en la formación de SSA orgánicos,

los sulfuros de hierro se oxidan a sulfatos férricos y en menor proporción a jarosita, presentando, al igual que en SSA minerales, limitaciones en el ámbito agrícola y ambiental, principalmente por la disolución de Fe^{3+} y Al^{3+} soluble.

En la Figura 4.22, la menor pendiente del modelo lineal del pH muestra que horizontes sulfúricos de SSA actuales orgánicos presentan condiciones de acidificación y oxidación con pH menores a 3,5 y Eh (mV) no mayores a 450, con una menor evolución de las condiciones redox de los horizontes minerales (Aj, Bj y Bgj), que indican Eh mayores a 500 y pH menores a 3,5. Estos parámetros diferencian e identifican horizontes sulfúricos orgánicos, minerales, y estiman los minerales involucrados en esta dinámica (Tabla 4.8). La relación entre el potencial redox y el tipo de mineral característico de condiciones sulfatadas ácidas, coincide con parámetros determinados por Breemen (1982), Mensvoort y Quang (1988), Hicks *et al.* (2002) y Gómez *et al.* (2005).

Tabla 4.8 Formación de minerales que identifican SSA con respecto al pH y al potencial redox Eh (mV)

pH	Eh (mV)	Mineral precipitado	Color
< 3,7	400 a 1200	jarosita	Amarillo
2-7	100 a 500	Gohetita	Naranja, pardo rojizo
4,5-12	-400 a 1000	Hidróxidos de hierro	Rojizos
<4	300-400	Sulfatos ferrosos	Gris a negro rojizo
<4	-100 a 200	Sulfuros de hierro	Gris oscuro
5-8	-500 a 0	Pirita	Negro
3,5-7		Yeso	Cristales traslúcidos

Fuente: Breemen (1986); Mensvoort & Quang (1988); Gómez *et al.* (2005).

Relación entre el aluminio de cambio y el potencial redox-Eh (mV). Aunque la dinámica del Al^{3+} no depende naturalmente de las condiciones redox, sino de los procesos de hidrólisis (Zapata, 2004), en SSA los productos de hidrólisis del Al^{3+} se relacionan indirectamente con las condiciones redox, por la reacción con compuestos oxidados que forman sulfatos metálicos como la alunita, jurbanita y la disolución de minerales arcillosos por parte del ácido sulfúrico que produce formas libres de Al^{3+} en solución (Frink, 1972; Gómez *et al.*, 2005). Estas formas solubles iónicas y de sulfatos de aluminio se especieron en horizontes sulfúricos en los suelos de estudio.

Con la relación significativa y consistente del número de muestras analizadas (n=117) en SSA continentales del valle alto del Chicamocha, se estableció un modelo para estimar la medida del potencial redox (Eh), utilizando como variable el Al^{3+} intercambiable:

$$Eh(mV) = Al \text{ intercambiable (cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}) \cdot 18,788 + 309,32 \quad (4.19)$$

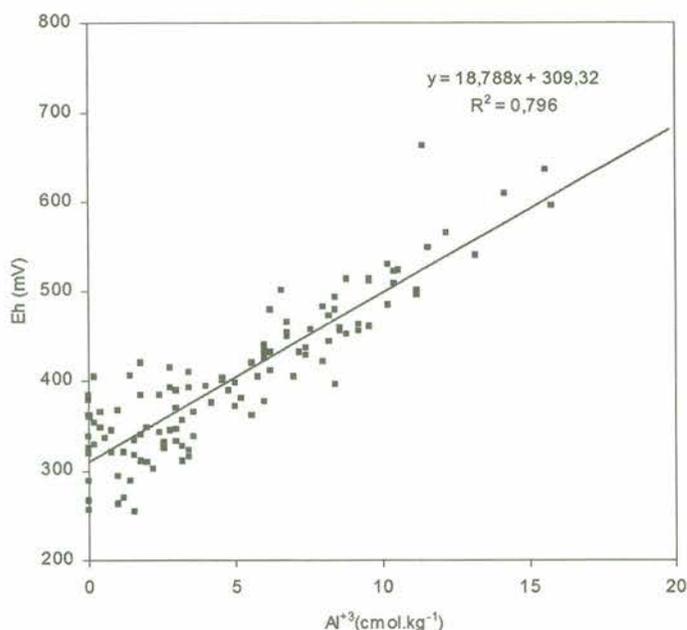


Figura 4.24 Comportamiento del potencial redox y aluminio de cambio (Al^{3+}) KCl 1N, en horizontes diagnósticos de SSA actuales. Valle alto del río Chicamocha-Boyacá.

Fuente: Gómez et al. (2005).

Lo anterior se ilustra en la Figura 4.24 donde se observa una correlación significativa directa y proporcional entre el Eh (mV) y el aluminio de cambio, de tal manera que la mayor oxidación genera mayor acidificación y disolución de formas de aluminio intercambiable en un rango crítico que identifica horizontes sulfúricos con valores superiores a 5 $cmol \text{ kg}^{-1}$ de Al^{3+} , $pH < 4$ y $Eh > 400$ mV, parámetros que, en conjunto, se utilizan para la identificación de SSA oxidados. Se estima igualmente que cuando el $Eh > 330$ mV, el aluminio comienza a ser tóxico (Gómez et al., 2005).

4.2.5 Maduración de SSA. El concepto de maduración incluye los procesos físicos, químicos y biológicos de depositación de materiales lacustres y

su posterior transformación, después del desecamiento o drenaje de los suelos (Dent & Pons, 1995).

La maduración física está relacionada directamente con la pérdida irreversible del agua. Los sedimentos arcillosos y orgánicos depositados en medios lacustres anegados presentan una débil estructura y consecuentemente, el espacio poroso está saturado de agua. La estructura es fácilmente deformada con una alta porosidad total dentro de los agregados, y no existen poros gruesos, de tal manera que la conductividad hidráulica es baja, a excepción de la presencia de poros gruesos dejados por raíces antiguas (Dent & Pons, 1995).

Durante la sedimentación en medios lacustres, el agua se pierde como resultado del drenaje, evaporación y extracción por las plantas. La evaporación y transpiración son procesos que aceleran el estado de maduración del suelo, por la mayor resistencia que se necesita para remover el agua de los pequeños poros de los sedimentos.

Estimativos de propiedades mecánicas relacionadas con la humedad del suelo y procesos de maduración (n-value). Concepto utilizado para simplificar y definir el grado de madurez física de sedimentos lacustres (materiales sulfídicos y horizontes sulfúricos). Según Soil Survey Staff (2010), el valor *n* es útil para predecir si un suelo puede ser pastoreado por el ganado o está en capacidad de soportar otras cargas, y para predecir el grado de subsidencia que puede ocurrir después del drenaje. Para materiales minerales del suelo que no sean tixotrópicos, el valor de *n* se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\text{valor } n = (A - 0.2R) / (L+3H) \quad (4.20)$$

A= % de agua en el suelo en condiciones de campo calculado con base en el peso de suelo seco. **R**= % de limo + arena. **L**= % arcilla. **H**= % de materia orgánica (% carbono x 1.724)

Para la interpretación de este parámetro, se utilizan los siguientes valores:

$n < 0,7$: material maduro, firme, particularmente no pegajoso, no puede ser apretado entre los dedos.

$n = 0,7$ a $1,0$: material medianamente maduro; es moderadamente firme, tiende a pegarse a las manos, y puede ser amasado pero no apretado entre los dedos. Su contenido de agua se encuentra entre 55 y 65 %. En suelos no alterados puede soportar el peso de maquinaria liviana, dificultad en la labranza.

$n = 1,0$ a $1,4$: material moderadamente blando, pegajoso y puede ser apretado entre los dedos. Su contenido de agua es entre 65 y 70 % y su fuerza mecánica es baja cuando es alterado. Labranza muy limitada por hundimiento y pegajosidad.

$n = 1,4$ a $2,0$: material prácticamente inmaduro, es muy blando (lodo); puede ser apretado entre los dedos por una presión ligera. Su contenido de agua es entre 70 y 80 %. Un hombre se puede hundir hasta sus muslos a menos que haya vegetación de soporte.

$n > 2,0$: barro totalmente inmaduro, es fluido, fluye entre los dedos. En sedimentos predominantemente minerales, el contenido de agua es > 80 % en masa.

Evaluación de la madurez de SSA del valle alto del río Chicamocha. De acuerdo con la determinación del valor n realizado para SSA de estudio, se observa que, en general, los suelos del distrito son medianamente maduros, con *valor n* que varía entre 0,7 a 1,0 (Figura 4.25). Esto se explica por la mayor oxidación y acidificación causada por más de 60 años de drenaje a las tierras que conforman la planicie fluvio lacustre del valle.

De esta manera se observan horizontes inmaduros orgánicos correspondientes a SSA potenciales de los *Typic Sulfihemists* con un *valor n* de 1,1, para suelos de madurez intermedia, como los *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfohemists*, se observan *valores n* entre 0,7 a 1,0 y SSA maduros como los *Typic Sulfaquepts* y *Sulfic Endoaquepts* con $n < 0,7$. La densidad aparente es usualmente un indicador de la madurez para SSA, como se observa en la Figura 4.25, lo que coincide con relaciones encontradas por

Dent (1986) para suelos fluvio-marinos en el norte de Nueva Zelanda, donde, densidades mayores a $0,8 \text{ g cm}^{-3}$ generalmente expresan madurez y oxidación en condiciones sulfatadas ácidas. Esta característica facilita reconocer las restricciones en el uso de maquinaria, de tal manera que suelos con $n > 0,7$ comienzan a presentar restricciones en el uso de maquinaria pesada en su laboreo.

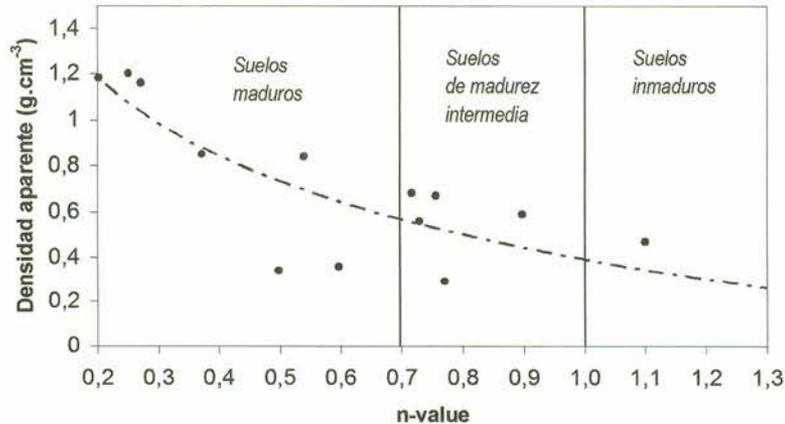


Figura 4.25 Relación entre la densidad aparente y la madurez del suelo (valor n) en SSA del valle del río Chicamocha.

Fuente: Gómez (2006).

4.3 EVOLUCIÓN DE SSA EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA

4.3.1 Secuencia evolutiva de horizontes diagnósticos y su relación con perfiles pedogenéticos. A partir del muestreo y análisis detallado en campo y laboratorio de las 2756 ha inventariadas en este estudio, junto con el conocimiento de los factores y procesos ya analizados, se pudo establecer la relación entre las características diagnósticas de SSA y la secuencia de horizontes y perfiles pedogenéticos. Las propiedades identificadas en cada horizonte, que en su conjunto caracterizan el perfil modal de suelos, están asociadas con características geomorfológicas, químicas, físicas, morfológicas y micromorfológicas de horizontes sulfúricos o materiales sulfídicos.

En este análisis se determinaron y aplicaron subíndices específicos que distinguen la clase de los procesos y describen el desarrollo de horizontes en los perfiles de suelos (Dent, 1986).

Posterior al drenaje, las sales solubles se lavan y comienzan los procesos de maduración de horizontes anegados en áreas fluviolacustres. Donde no hay desarrollo de SSA, el drenaje facilita el normal establecimiento de cultivos en poco tiempo, pero donde se presentan estos suelos y no existe una capacidad de autoneutralización de los productos ácidos provenientes de la oxidación de sulfuros de hierro, el pH cae dramáticamente y se forman horizontes sulfúricos (Dent & Pons, 1995).

Debido a que la zona de estudio ha sido un área drenada, los SSA del DRACH se identifican por ser SSA actuales con el desarrollo principal de horizontes minerales sulfúricos con transición a cámbicos, seguidos por horizontes orgánicos sulfúricos y, en menor proporción, materiales sulfúricos que se encuentran en profundidad.

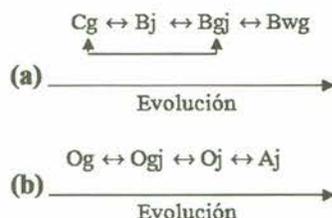


Figura 4.26 Secuencia evolutiva en el desarrollo de horizontes en SSA del Valle Alto del Chicamocha. (a) Secuencia en el desarrollo de horizontes minerales. (b) Secuencia en el desarrollo de horizontes orgánicos. Fuente: Gómez (2006).

La Figura 4.26 ilustra la posible secuencia del desarrollo de horizontes minerales y orgánicos en SSA del DRACH. Esta evolución se manifiesta después del drenaje, debido a los procesos de oxidación, con cambios en la formación de minerales, características morfológicas, químicas, y maduración física (*valor n*), como se describe en la Tabla 4.9.

Tomando como referente lo tratado por Soil Survey Staff (2010), Dent (1986), Pons y Breemen, (1982), a continuación se presenta la descripción de horizontes minerales y orgánicos encontrados en SSA.

Descripción de horizontes minerales diagnósticos en SSA. La caracterización de horizontes diagnósticos facilita determinar la evolución dentro del perfil y definir el tipo de SSA para su clasificación y manejo.

Horizonte Cg. Una vez la vegetación se ha establecido en la zona pantanosa, ocurre la sedimentación de partículas minerales finas y orgánicas que constituyen las arcillas lacustres en el fondo del lago. Su formación depende de la ubicación del área depresional y del tiempo de permanencia del régimen ácuico. Son materiales sulfídicos de condición permanentemente reducida. Dent (1986) los define como Gr o G y los denota como materiales hidromórficos inmaduros con *valor n* mayor a 1, y generalmente confinados por una lámina de agua.

Tabla 4.9 Descripción de horizontes minerales y orgánicos encontrados en SSA continentales lacustres del valle alto del río Chicamocha, Boyacá, Colombia.

Cg	Capas prácticamente inmaduras (valor $n > 1$), permanentemente reducidas con acumulación de sulfuros de hierro y color gris gleyzado.
Bj	Horizonte ultraácido, con abundantes y contrastantes características redoximórficas amarillo pálido de jarosita y pocas a comunes rojizas de hidróxidos de hierro, sobre una matriz gris oscura; maduración media o mayor, puede presentar alguna reserva de sulfuros de hierro (valor n 0,7-1,0).
Bgj	Horizonte ultraácido a muy fuertemente ácido con abundantes y contrastantes características redoximórficas rojizas de hidróxidos de hierro amorfos y pocas a comunes, amarillas, de jarosita (por hidrólisis fuerte de jarosita) gris oscura o gris parda; suelo maduro (valor $n < 0,7$).
Bwg	Horizonte fuertemente ácido, no presenta condiciones extremas de acidez ni se evidencia jarosita, dominan abundantes características redoximórficas rojizas de ferrihidrita, goetita o hematita contrastantes en una matriz gris pardas oscuras; en algunos casos puede presentar formas de yeso, suelo maduro (valor $n < 0,7$).
Aj	Horizonte superficial mineral con alta influencia de materiales orgánicos, reacción ultraácida con evidencia de características redoximórficas de jarosita y rojos naranjas de Shwertmanita. Eh positivos. Horizontes maduros con $n < 0,5$.
Oj	Horizonte superficial orgánico y ultraácido, no evidencia características redoximórficas de H-jarosita, puede contener partículas de sulfuros de hierro, Eh positivos. Prácticamente maduro con $n < 0,5$.
Ogj	Horizonte de transición entre materiales orgánicos sulfídicos y horizontes sulfúricos orgánicos Oj, con maduración media, con n entre 0,5 - 1.
Og	Materiales sulfídicos orgánicos prácticamente inmaduros con $n > 1$ y Eh negativos.
Ogy	Horizonte orgánico con presencia de yeso y materiales sulfídicos, caracteriza procesos de autoneutralización.

Fuente: Gómez (2006), adaptado de Dent (1986); Dent & Pons (1995); Pons & Breemen (1982) en SSA tropicales.

Los materiales orgánicos provenientes de la vegetación lacustre son fuente de energía para la actividad de bacterias reductoras de azufre y la formación de sulfuros de hierro. Esta característica los define como materiales sulfídicos, es el principal horizonte de acumulación de monosulfuros de hierro. La concentración de sulfato total es variable pero puede llegar a valores mayores a 2 % de S total (Dent, 1986), como ocurre con valores de S total descritos en el piso lacustre del DRACH (Gómez, 2006). Sus condiciones redoximórficas se caracterizan por colores grises (gley).

En el desarrollo del horizonte Cg, se distinguen las siguientes características:

- Colores grises oscuros (2,5 Y, 5 Y) o grises verdosos oscuros (2,5 B, 5 B), comúnmente con moteados negros (10 YR) alrededor de las fisuras dejadas por las raíces.
- Prácticamente inmaduros con *valor n* entre 0,7 a 1, sin estructura y con apariencia “mantequillosa”.
- Poros muy finos y dendríticos.
- Respecto al límite del horizonte, son finamente estratificados con mezcla de sedimentos muy finos y orgánicos, no muestran una estratificación regular sin estructura.
- Olor fuerte a sulfuro de hidrógeno
- Se encuentran irregularmente a una profundidad entre 1,2 y 2 m.
- pH entre 5,5 a 6,5.
- Valores de Eh entre 200 mV a -200 mV.
- Valores de S total mayores a 2 %.
- Reacción muy fuerte al peróxido de hidrógeno.
- Permanentemente saturados de agua.

En SSA del valle del río Chicamocha, estos materiales se encuentran de forma irregular dependiendo de la forma de terreno y depositaciones lacustres. Se caracterizaron en los *Typic Sulfosaprists* a una profundidad de 1,2 m, localizados en la cubeta inferior y a profundidad no mayor a 2 m en las demás unidades de suelos. Las características fisicoquímicas del horizonte Cg se describen en la Tabla 4.9.

Horizonte Bj. Al drenarse el horizonte Cg, se oxidan rápidamente los materiales sulfídicos con una caída dramática del pH y se forma jarosita en medios ultraácidos, de tal manera que da origen al horizonte Bj. En los suelos de estudio, este horizonte sulfúrico se encuentra en los *Typic Sulfosaprists* con las siguientes características morfológicas, físicas y químicas, que comprueban algunos aspectos diagnósticos descritos por Dent (1986).

- Predominan características redoximórficas de colores amarillos pálidos de k-jarosita (2,5 Y 8/6; 2,5 Y 7/4) entre las caras de los ped y en los poros (recubren canalículos de raíces) abundantes y contrastantes, y pocas a comunes rojizos de oxihidróxidos de hierro, sobre una matriz gris oscura.
- pH menores a 3,5.
- Suelos moderadamente maduros (*valor n* menor a 0,7), textura arcillosa, estructura moderada a débil.
- Pueden contener aún materiales de sulfuros de hierro que estarían en posibilidad de reaccionar y acidificarse.
- La salinidad persiste a profundidad en contacto con el nivel freático.
- Valores de Eh mayores de 400 mV.
- Valores de S total entre 1-1,6 %.
- Espesor del horizonte entre 15-30 cm.
- Se encuentra entre 30 y 80 cm de profundidad de la superficie del perfil.

En la sección delgada de los Bj se evidencia una estructura débil y texturas finas ($Ar > 60\%$), de color pardo grisáceo claro. Como rasgos pedológicos se presentan rellenos completos e incompletos de jarosita en los canales, y hacia el borde de los mismos se observan fenómenos de hidrólisis bajo la forma de recubrimientos de hidróxidos de hierro en capas delgadas (Figura 4.27).

La ocupación del espacio poroso por parte de la jarosita limita físicamente el movimiento interno del agua afectando la conductividad hidráulica.



Figura 4.27 Sección delgada del horizonte Bj de SSA valle alto del río Chicamocha. Microfotografía de luz polarizada, lente conoscópica, nicols paralelos a 140 aumentos.

Fuente: IGAC (2006).

Horizonte Bgj. Cuando el drenaje se mantiene en suelos bajo condiciones sulfatadas ácidas, el horizonte Bj cambia a Bgj por procesos fuertes de hidrólisis y lavado, este también se puede formar directamente por la transformación del Bwg (Dent, 1986). Su característica típica es el mayor predominio de condiciones redoximórficas de hidróxidos de hierro de color rojizo y naranja sobre la jarosita, distinguiéndose un nuevo horizonte subsuperficial con los siguientes aspectos:

- Matriz gris parda a oscura (10 YR 4/2, 7,5 YR 5/1), con moteados y recubrimientos de jarosita (2,5 Y 8/4) alrededor de los poros y fisuras, con depósitos irregulares delgados de hidróxidos de hierro pardos rojizos (10 YR 5/8, 5YR 4/8) y sobrepuestos y más abundantes que la jarosita. En horizontes Bgj más jóvenes se encuentran masas de hierro rojas oscuras (2,5 YR 2,5/3) cubiertas por precipitados de jarosita.
- Los rangos de pH varían entre 3,5 y 4,0.
- Suelos maduros con $n < 0,7$.
- La estructura varía de prismática a bloques angulares, en profundidad se presentan fisuras verticales.
- La salinidad persiste en profundidad en contacto con el nivel freático.
- En la sección control, el horizonte se encuentra entre 30 a 100 cm.
- Espesor del horizonte entre 15 a 40 cm.
- Horizonte de baja conductividad hidráulica.

En SSA del valle alto del río Chicamocha, los horizontes B_{gj} se encuentran en los *Sulfic Endoaquepts* y en los *Typic Sulfaquepts*. En campo, se describen a una profundidad entre 30 a 80 cm de la superficie, con características típicas redoximórficas de hidróxidos de hierro rojos muy oscuros tipo ferrihidrita (2,5 YR 2,5/3); pocos, rojo amarillentos (5 YR 4/8) comunes y amarillo pálidos de jarosita (2,5 8/4), pocos, presentes en masas irregulares o en hipocutanes recubriendo superficialmente las caras de los pedos, los poros, y asociados a los canalículos de las raíces (Figura 3.3).

Son horizontes sulfúricos de transición con un estado de oxidación intermedia entre los B_j y los B_{wg}, con sulfatos solubles en agua mayores al 0,1 %. Presentan texturas arcillosas y moderado contenido en carbono orgánico.

En la sección delgada de los B_{gj} (Figura 4.28) se evidencia un plasma masivo que contrasta con una textura fina con arcillas mayores a 60 %, de color pardo grisáceo claro. Presenta una microestructura surcada por canales elongados, cilíndricos, irregulares y algunos ramificados, y, en menor cantidad, cavidades.

Los poros presentan segregación (manchas de hierro en sus bordes) e hipocutanes de hidróxidos de hierro amorfos (producto de la actividad iónica). Los hidróxidos de hierro son impregnativos en la matriz de arcilla con color amarillo ocre pasando a pardos rojizos en varios tonos, estos se producen por difusión y oxidación en forma de bandas continuas y discontinuas por hidrólisis de la jarosita a diversas formas de hidróxido de hierro como ferrihidrita (Figura 4.28). Estas condiciones muestran claramente los fuertes procesos de oxidorreducción y la transición del horizonte sulfúrico jarosítico a la formación de hidróxidos de hierro como ferrihidrita.

En la Figura 4.28 se observa el canal de una raíz recubierto por jarosita de color amarillo pardo en área adyacente a la matriz arcillosa (izq). Subsecuentemente, la jarosita es hidrolizada y precipita en forma de hidróxidos de hierro amorfos, tornándose de un color pardo rojizo en diversos tonos (der.). La transición anterior muestra la hidrólisis de la jarosita y formación de hidróxidos de hierro, como ferrihidrita-goetita.



Figura 4.28 Sección delgada del horizonte Bgj (izq). Condiciones redoximórficas en horizontes Bgj (transición de jarosita a ferrihidrita) (der). SSA valle alto del río Chicamocha. Microfotografía con nicoles paralelos a 140 aumentos.

Fuente: IGAC (2006), Gissat (2006).

Horizonte Bwg. Son los horizontes de transformación más evolucionados de los SSA; de reacción moderada a fuertemente ácidos, no presentan condiciones extremas de acidez ni se evidencia jarosita, dominan características redoximórficas rojizas de óxidos de hierro, abundantes y contrastantes en una matriz gris parda oscura; suelo maduro (*valor $n < 0,7$*). La duración de la etapa de extrema acidez en horizontes Bj o Bgj, depende de la reserva de sulfuros de hierro que contengan y de la tasa de oxidación (Dent, 1986; Breeman, 1982).

El desarrollo del horizonte Bwg puede deberse a varias causas: una, a partir de una fase inicial extremadamente ácida, causada por la oxidación de sulfuros de hierro. Este fenómeno puede permanecer por décadas hasta el agotamiento de la fuente de sulfuros y el lavado continuo de los ácidos libres, formándose hidróxidos de hierro en los poros y fisuras del suelo hasta no evidenciarse jarosita, minimizándose los niveles de sulfato soluble por lavado y facilitando el establecimiento de cultivos.

En este sentido, se forma un horizonte cámbico desaturado en bases, pero con predominio de Al^{3+} , como es característico en los horizontes Bwg de los *Typic Sulfaquepts* y los *Sulfic Endoaquepts* de estudio, con saturaciones de aluminio mayores a 80 % y sulfatos solubles menores a 0,05 %.

Por otra parte, se puede relacionar con una fase de acidez residual causada por la lenta hidrólisis de la jarosita a hidróxidos de hierro, y procesos alternos

de autoneutralización asociados a formas de Ca soluble causado por la estacionalidad climática. En épocas secas existe la liberación de ácidos y en épocas húmedas se dan los procesos de hidrólisis con precipitación de formas de Fe^{3+} . Este proceso puede durar años y facilita la colonización gradual de raíces por el lavado de ácidos, dependiendo de la fluctuación del nivel freático. Los efectos negativos en su maduración son de carácter físico con problemas relacionados con el sellamiento del espacio poroso que afectan el comportamiento hidrodinámico del agua.

En suelos del valle alto del río Chicamocha, el desarrollo del horizonte Bwg se observa en los *Sulfic Endoaquepts* y los *Typic Sulfaquepts* y depende de la fluctuación y profundidad del nivel freático, con un mayor desarrollo en la cubeta superior en áreas moderadamente drenadas, con mayor lavado de ácidos solubles. Las siguientes características morfológicas, físicas y químicas que identifican horizontes Bwg, caracterizan los SSA de estudio y se relacionan con descripciones hechas por Breeman (1982).

- Físicamente maduro, *valor n* menor a 7,0.
- Características redoximórficas gruesas a medias contrastantes, rango del color de la matriz de pardo grisáceo oscuro (10 YR 2,5/2) a pardo grisáceo rojizo.
- Fuerte desarrollo de estructura, media a gruesa, prismática, recubrimientos orgánicos y férricos entre las caras de los peds y en los poros.
- pH en campo entre 4,0 y 5,0; nivel donde los requerimientos de encalamiento son menores que en horizontes sulfúricos, con un mejor crecimiento de vegetación.
- Baja salinidad, CE menor a 2dS m^{-1} .
- Bajo sulfato soluble, menor a 0,1 %.
- Baja saturación de bases, menor a 40 %, alta saturación de aluminio: mayor a 60 %.
- En campo, los Bwg se localizan a una profundidad entre 20 a 60 cm de la superficie, con características típicas redoximórficas de óxidos de hierro, rojos muy oscuros (2,5 YR 2,5/3) abundantes, rojo amarillentos (5 YR 4/8) comunes, presentes en masas irregulares o en hipocutanes,

recubriendo superficialmente las caras de los peds, los poros, y asociado a los canalículos de las raíces.

En campo, se observan sobre una matriz parda con formación de óxidos de hierro rojizos oscuros (hematita), pardos rojizos (ferrihidrita), sobre las caras de los peds y recubriendo las fisuras del suelo.

En la sección delgada de los Bwg (Figura 4.29), se evidencia un plasma masivo relacionado con las concentraciones de arcilla mayores a 70 %, surcado por abundante cantidad de canales y cavidades ovoides, irregulares y heterométricos donde se forman nódulos de hierro, que guardan paralelismo con el eje C del perfil. Respecto a los rasgos pedológicos, presentan revestimientos e hiporevestimientos de óxidos hidratados de hierro que impiden el movimiento interno del agua en el suelo, limitando la conductividad hidráulica. Los cutanes son de color rojizo oscuro y los hipocutanes de color naranja; en la matriz se encuentra difundidas manchas de hierro en forma de mosaico.

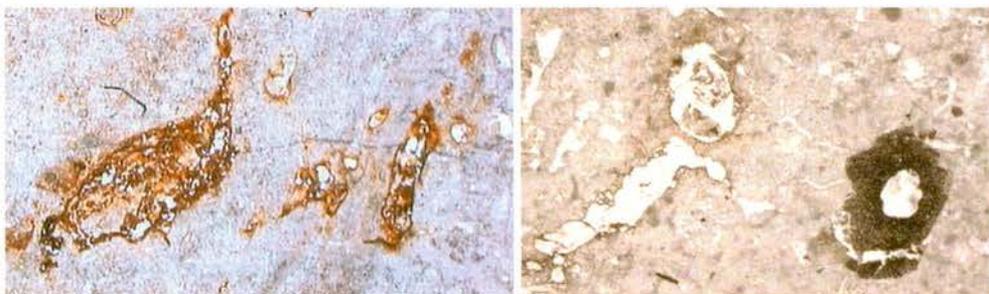


Figura 4.29 Sección delgada del horizonte Bwg: óxidos hidratados de hierro, rojizos oscuros (hematita) y naranjas (ferrihidrita) (izq.). Corte transversal mostrando sellamiento de poros por óxidos hidratados de hierro en horizontes Bwg (der). SSA Valle alto del río Chicamocha.

Fuente: IGAC (2006).

Descripción de horizontes orgánicos y órgano minerales diagnósticos.

Horizontes Og - Ogy. Caracterizados por ser materiales sulfídicos orgánicos subsuperficiales y prácticamente inmaduros con $n > 1$, Eh negativos y S total mayores a 2 %. En la sección delgada, la materia orgánica se observa como acumulaciones de residuos orgánicos de plantas y raíces abundantes. Estos fragmentos frescos son de color negro y se observan también procesos

de oxidación de formas férricas que se difunden en la matriz (Figura 4.30). Las características anteriores coinciden con la identificación de materiales sulfídicos (formas de sulfuros de hierro asociadas a desechos orgánicos descompuestos) de acuerdo con descripciones de secciones delgadas en SSA hechas por Dent (1986), Wagner *et al.* (1982) y Wada y Seisuwan (1988).

Estas propiedades se identifican en las secciones delgadas de los Aj y Og en SSA orgánicos de los *Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfihemists* y *Typic Sulfohemists* ubicados en la cubeta inferior del valle alto del río Chicamocha.

De acuerdo con Wada y Seisuwan (1988), en horizontes donde se dan las condiciones para la formación de sulfuros de hierro, estos se ubican en racimos dentro de las células de los tejidos de residuos de plantas o dispersos en la matriz del suelo. El número y la densidad de las partículas tienden a aumentar con el mayor estado de descomposición de los materiales orgánicos, y son rodeados por halos rojizos de óxidos de hierro. Las partículas de piritita pueden ser transportadas separadamente y acumularse con los sedimentos arcillosos lacustres en horizontes Cg o Bj.



Figura 4.30 Partículas de sulfuros de hierro (color negro) asociadas a los residuos de tejidos orgánicos distribuidos en la matriz de SSA. Se observa la oxidación de estos materiales, generando color ocre en la matriz de horizontes Aj, Oj y Og (microfotografía a color con nicóles paralelos, luz polarizada a 43,75 aumentos). Valle Alto del Río Chicamocha.

Fuente: IGAC (2006).

Como rasgos pedológicos, en algunos horizontes (*Typic Sulfihemists*) se observan abundantes cristales idiotípicos de yeso, característica que identifica a los horizontes Ogy. Los cristales son de tamaño superior a 20 micras, desde muy finos hasta grandes mayores de 1 mm. Estos se

encuentran como unidades individuales y están relacionados con poros inped y exped, que dependen del tamaño de los agregados (Figura 4.31). Esta marca genética demuestra fenómenos de autoneutralización de formas ácidas provenientes de la oxidación de sulfuros de hierro en medios con alta concentración de formas solubles de Ca (Dent, 1986; Nettleton et al., 1982).



Figura 4.31 Vista microscópica de cristales de yeso en el horizonte Oj de los *Typic Sulfohemists*. Cubeta inferior de la planicie fluvioacustre del río Chicamocha. Se observan cristales de diferentes tamaños que reflejan claramente la luz.

Fuente: IGAC (2006).

Horizonte Oj. El horizonte Oj se desarrolla a partir del drenaje de materiales orgánicos potenciales Og, con una maduración creciente por la pérdida de agua; además, si se encuentra en superficie, se transforma a horizontes Aj. De otra parte no se evidencian claramente características redoximórficas de jarosita, particularidad común en SSA orgánico (Dent, 1986; Mensvoort, 1988).

La formación de jarosita en los *Typic Sulfohemists* se observa en forma esporádica con la aparición de betas amarillas claras. Esta clase de SSA son reconocidos por su reacción ultraácida ($\text{pH} < 3,5$) y las altas concentraciones de sulfatos solubles superiores a 0,1 %.

Dent (1986) explica que la baja acumulación de jarosita en materiales orgánicos se debe a la liberación continua de formas solubles de hierro. Bajo estas condiciones, los sulfuros de hierro oxidan frecuentemente a formas de sulfatos ferrosos solubles sin precipitar a jarosita (Mensvoort et al., 1988).

Las observaciones micromorfológicas en horizontes Oj de los *Typic Sulfohemists* del valle alto del río Chicamocha, confirman la naturaleza de fragmentos finos orgánicos compactados y la frecuente mezcla con sedimentos minerales finos arcillosos (Figura 4.32), los cuales inciden en una baja conductividad hidráulica y baja porosidad, características observadas por Mensvoort *et al.* (1988) en SSA orgánicos del Delta de Mekong en Vietnam. De otra parte, en la fracción mineral se presentan formaciones de hidróxidos de hierro.

Otro aspecto para resaltar en horizontes sulfúricos orgánicos Oj y que demuestra la transformación de horizontes orgánicos, es la presencia de material silificado de plantas, lo cual evidencia procesos de alteración del Silicio (Si) bajo condiciones sulfatadas ácidas (Figura 4.32). Breemen (1982) explica que la formación de estos fósiles microscópicos se debe a la alta disolución del Si en medios sulfatados ácidos, con una acumulación de SiO₂ amorfo sobre las plantas (calculado también como producto de actividad iónica IAP), constituyendo réplicas que permanecen con una excelente preservación, como se observa microscópicamente en detalle en la sección delgada de horizontes Oj de *Typic Sulfohemists*.

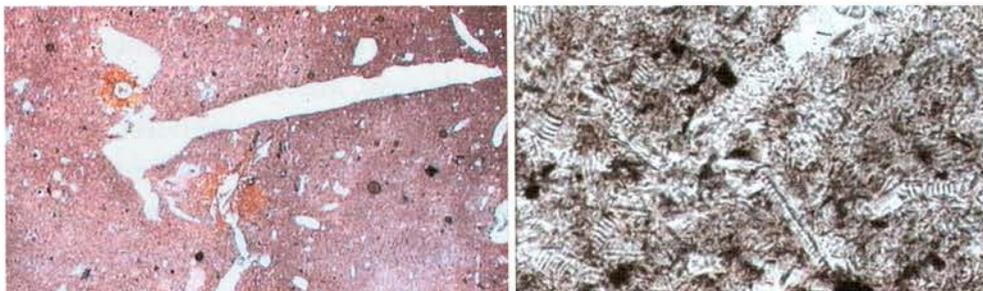


Figura 4.32 Microfotografías en horizonte Oj: fragmentos finos orgánicos mezclados con sedimentos minerales finos (izq); material de plantas silificadas en *Typic Sulfohemists* (der).

Fuente: IGAC (2006).

Horizonte Aj. Horizonte superficial resultado de la maduración de horizontes Oj, con alta influencia de material orgánico. Se presenta en *los Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfohemists*, manifiesta una mayor dinámica de oxidorreducción que los Oj, evidenciándose características redoximórficas de K-jarosita e hidróxidos de hierro amorfos.

Estos horizontes se encuentran en los *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfohemists* que se desarrollan en suelos de la cubeta inferior por exposición de materiales sulfídicos orgánicos en superficie, los cuales, al drenarse, se oxidan perdiendo gradualmente el carbono y se convierten así en un horizonte mineral Aj por transformación del Oj. Las áreas lacustres más bajas de la planicie, se caracterizan por presentar una menor influencia de material coluvial y por ser las últimas áreas drenadas, por ello la característica orgánica y órgano-mineral de estos horizontes (sector Vueltas y Vargas).

4.3.2 Secuencia evolutiva de perfiles modales de SSA en la planicie fluvio lacustre del valle alto del río Chicamocha. La Figura 4.33 ilustra una posible secuencia evolutiva de los SSA del valle alto del río Chicamocha. Primero se definen dos grandes grupos de evolución: SSA orgánicos y SSA minerales. La evolución de los SSA de estudio depende de la posición dentro de la planicie fluvio-lacustre, el espesor de colmatación de los materiales coluvio-aluviales y la proximidad de los horizontes sulfúricos a superficie.

De acuerdo con las Figuras 4.33 y 4.34, en la cubeta inferior próxima al área pantanosa y lacustre, en el reborde de los coluvios, se encuentra el **estado A**, que representa el suelo más joven. Es un SSA orgánico (*Typic Sulfohemists*), que puede llegar a oxidarse, pero presenta fenómenos fuertes de autoneutralización con la formación de yeso, identificado en horizontes Oey. El suelo presenta el mayor % S total con valores superiores a 2 % y hasta 16 %, lo cual demuestra condiciones de SSA potenciales inmaduros. Estos se encuentran en zonas depresionales con mayor acumulación de materiales orgánicos (MO > 30 %) e influencia de material coluvial calcáreo (Figura 4.34). El **estado B** representa suelos orgánicos (*Typic Sulfohemists*), los cuales se encuentran en la cubeta inferior, en el área depresional de la planicie fluvio-lacustre, en una etapa de evolución intermedia y presencia de horizontes sulfúricos hísticos muy superficiales, lo cual demuestra la fuerte oxidación de materiales, originando áreas escaldadas. El **estado C** (*Typic Sulfosaprists*) constituye una etapa de transición entre SSA orgánicos y minerales (*Typic Sulfaquepts*), que se encuentra entre la cubeta superior e inferior, cuya evolución de horizontes sulfúricos evidencia jarosita. Este perfil puede representar el último estado de acidificación identificando SSA de maduración intermedia.

En la secuencia evolutiva siguen los SSA minerales distribuidos en la cubeta superior cercanos a las áreas coluvio-aluviales. Estos presentan una mayor evolución y definen el **estado D** (*Typic Sulfaquepts*) con horizontes sulfúricos superficiales (más cercanos a la cubeta inferior) y el **estado E** (*Sulfic Endoaquepts*), los cuales presentan horizontes sulfúricos a profundidad y horizontes cámbicos en superficie con mayor espesor de materiales coluvio-aluviales. Allí, alguna vez se manifestaron procesos de sulfatación, y, por efecto del lavado y transformación de minerales de Fe y S, muestran la fuerte evolución de estos hasta convertirse en horizontes desaturados con presencia de óxidos de hierro (cámbicos).

Los materiales sulfúricos se transformaron en horizontes sulfúricos en unas pocas décadas, cuando la zona sufrió el proceso de drenaje hace 60 años (maduración). Los sulfatos ferrosos provenientes de la oxidación formaron ácido sulfúrico y sulfatos solubles. En ausencia de sedimentos minerales, se conformaron horizontes sulfúricos hísticos (estado B), como en suelos minerales, donde se evidencia claramente jarosita producto de la oxidación de sulfatos ferrosos que se difunden dentro de las zonas de oxidación y se acumulan en profundidad bajo condiciones redoximórficas amarillas pálidas sobre materiales lacustres finos, formando horizontes sulfúricos minerales en profundidad (estados C y D).

A medida que existe mayor lavado de sulfatos y el pH sube a valores superiores a 4,0, la jarosita es lentamente hidrolizada a hidróxidos de hierro (ferrihidrita) y en superficie aparecen moteados pardos rojizos (estados D y E). La diferencia entre estos dos estados es la profundidad a la cual aparece del horizonte sulfúrico (Bgj), que para el estado D aparece más superficial con respecto al estado E.

En épocas de lluvia, los procesos de reducción movilizan el hierro y el sulfato de la superficie y de forma descendente lavan las formas ácidas, mejorando las condiciones químicas del suelo. A lo largo del tiempo se forman más óxidos férricos y estos suelos llegan a ser los más evolucionados (en términos de madurez pedológica, no de edad absoluta) y más drenados (*Sulfic Endoaquepts*, estado E), perdiendo más agua y acelerando el proceso de maduración física con un aumento progresivo de la densidad aparente y menores valores de *valor n*.

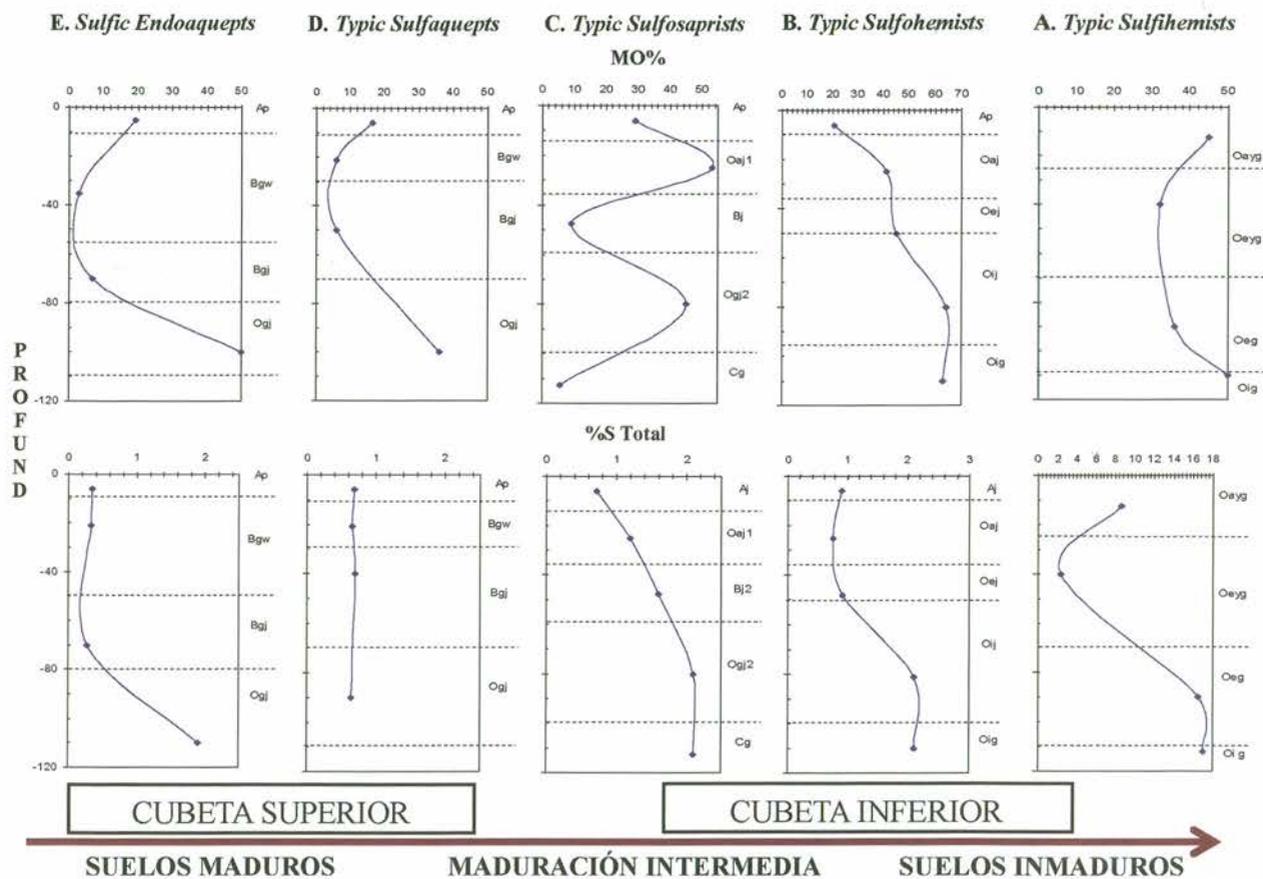


Figura 4.34 Distribución del azufre total (%) y la materia orgánica (%) en la secuencia evolutiva de perfiles modales de SSA de la planicie fluvio lacustre del valle alto del río Chicamocha.

Fuente: Gissat (2006).