

# Diagnóstico y control de la acidez en suelos sulfatados ácidos en el Distrito de riego del Alto Chicamocha (Boyacá) mediante pruebas de incubación<sup>1</sup>

## Diagnostic and controlling acidity in acid sulphate soils by using incubation tests at the Upper Chicamocha basin, Boyaca

Hugo E. Castro<sup>2</sup>, Manuel I. Gómez<sup>3</sup>, Oscar E. Munévar<sup>4</sup> y Dilsa M. Hernández<sup>5</sup>

**Resumen:** Los procesos de acidificación en suelos sulfatados ácidos (SSA) son complejos, con presencia de sales metálicas que por su carácter químico restringen severamente la productividad agropecuaria de las tierras; es el caso de los SSA del valle alto del río Chicamocha (Boyacá), donde existen alrededor de 3.000 ha afectadas en diferente grado por este problema. El diagnóstico y el control adecuados de la acidez mediante enmiendas básicas no se consideran integralmente en estos suelos: cuando se hacen para establecer cultivos, se incurre con frecuencia en aplicaciones generalizadas con diferentes dosis de cal, sin tener en cuenta el estado de acidez de áreas modales representativas. El presente estudio determinó, a través de pruebas de incubación en laboratorio, los requerimientos de cal para cada uno de los perfiles modales representativos de unidades de SSA, en términos de equivalente químico de  $\text{CaCO}_3$  (EQ  $\text{CaCO}_3$ ). Los resultados muestran que para el diagnóstico adecuado del requerimiento de enmiendas calcáreas en SSA debe considerarse: 1) los procesos químicos que caracterizan SSA actuales y pseudosulfatados; 2) la neutralización del aluminio de cambio hasta niveles inferiores al 20% de saturación para lograr pH entre 4,5 y 5,0; 3) el empleo de materiales en calantes de alta reactividad química que aseguren la neutralización de la acidez y el mejoramiento nutricional del suelo y 4) el tiempo de reacción de la enmienda, que no debe ser inferior a 30 d.

**Palabras claves adicionales:** suelos ácidos, requerimientos de cal, suelos pseudosulfatados

**Abstract:** Acid sulphate soil (ASS) acidification is a complex process, mainly due to the chemical and biochemical reactions taking place within these soils, commonly leading to the solubility of aluminium, sulphur, iron and manganese, these being elements which in excess can severely restrict agricultural productivity in such land. This is the case with the Province of Tundama, Sugamuxi, located in the upper River Chicamocha valley, where around 3 000 ha are affected by these soils. Suitable diagnosis and control of acidity using basic amendments is not often considered in these soils; when it is taken into account for establishing crops, the generalised application of different doses of lime is commonly encountered without bearing in mind the state of acidity characteristic of modal areas being representative of ASS. The present study used laboratory incubation tests for determining lime requirements in chemically equivalent  $\text{CaCO}_3$  (EQ  $\text{CaCO}_3$ ) terms for each SSA modal profile, representative of ASS units, cartographically delimited in a semi-detailed ASS study carried out by GISSAT. The results show that the following requirements must be born in mind when liming ASS: (1) diagnosing the condition of actual and pseudo-sulphate processes in ASS, (2) the neutralisation of exchange aluminium at less than 20% and pH greater than 4,5, 3) using highly reactive corrective agents and natural or industrial liming for nutritional purposes and 4) liming reaction time must not be less than 30 days after being applied.

**Additional key words:** acid soil, lime requirements, pseudosulphate soils

Fecha de recepción: 10 de marzo de 2006  
Aceptado para publicación: 11 de mayo de 2006

<sup>1</sup> Contribución del Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales (GISSAT). Proyecto Colciencias, UPTC y Usochicamocha, 2004-2006. e-mail: gissat@tunja.uptc.edu.co

<sup>2</sup> Profesor asociado, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Tunja. e-mail: hcastrofranco@yahoo.com.mx

<sup>3</sup> Director de investigación y desarrollo, Microfertisa SA, Bogotá. e-mail: migomez@microfertisa.com.co

<sup>4</sup> Ingeniero agrónomo, investigador, GISSAT y UPTC, Tunja. e-mail: osmunévar@hotmail.com

<sup>5</sup> Ingeniero agrónomo, investigador, Instituto Colombiano de para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas (Colciencias), GISSAT y UPTC, Tunja. e-mail: diherfo@yahoo.es

## Introducción

LOS SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS (SSA) situados en la cuenca alta del río Chicamocha se caracterizan por ser sistemas dinámicos con una degradación química continua por causa de procesos de acidificación actual severa, producto de la oxidación primaria de sulfuros de hierro y la generación de ácido sulfúrico, con la consecuente destrucción de minerales primarios e hidrólisis secundaria del aluminio (proceso de sulfatación) (Gómez, 2006). La mayor degradación química de estos suelos se identifica en campo por la presencia de horizontes sulfúricos y la acumulación de sales sulfatadas metálicas que originan superficialmente áreas escaldadas; este proceso explica el proceso de SSA actuales (Rosicky et al., 2004; Dent, 1985).

La naturaleza de la acidez en los SSA, junto con los productos finales de su reacción bioquímica en medios aeróbicos, da origen a formas libres de  $Fe^{+3}$  y  $Al^{+3}$ , como sulfatos metálicos, que actúan en los procesos de hidrólisis (Zhag y Luo, 2002; Fink, 1973; Ludwig et al., 1999). La acidificación de SSA contempla tres tipos de acidez: acidez real (acidez activa + acidez intercambiable); acidez retenida (acidez proveniente de minerales precipitados, como la jarosita) y acidez potencial (procesos de oxidación que pueden generar acidez actual y retenida). En estos suelos, las diversas formas de acidez hacen más complejos el diagnóstico y el control de la acidez y repercuten por lo general en la necesidad de una dosificación mayor de materiales encalantes para lograr neutralizarla hasta niveles tolerados por el cultivo (Zhag y Luo, 2002; Ahern et al., 2004).

La acidez originada por perturbación de los SSA y la estacionalidad climática en medios ultra-ácidos, con pH menor a 3,5, determinan cambios físicos, mineralógicos y bioquímicos en el suelo entorno a los procesos de acidez. Estos procesos, producto de la oxidación y sulfatación, intervienen en la degradación continua de suelos y aguas y, concomitantemente, en la pérdida de productividad agrícola (Rosicky et al., 2004; Gómez, 2006).

En el valle alto del Chicamocha se encuentran SSA de alta degradación química, oxidados y acidificados (SSA actuales), como los Typic Sulfaquepts, Terric Sulfo-sapristis y Typic Sulfhemists, y otros con menor impacto en las reacciones de sulfatación, como los Sulfic Endoaquepts y Typic Sulfhemists, que presentan procesos de autoneutralización de la acidez (suelos pseudosulfatados ácidos), en los que dominan las formas cristalizadas

de sulfato de calcio y aguas freáticas cargadas de sales básicas (Gómez, 2006).

Desconocer la situación cuantitativa de la acidificación y la alta capacidad buffer presente en los SSA repercute en un manejo inadecuado de las dosis y el tiempo de reacción del material encalante, que, a su vez, puede generar desbalances nutricionales por exceso de enmiendas, aumentar los costos de producción y causar detrimento en el desarrollo de los cultivos, principalmente de papa y hortalizas (GISSAT, 2004; Gómez y Castro, 2004). El éxito en el control de la acidez en los SSA depende en gran medida de qué tan acertado sea su diagnóstico inicial para proyectar su corrección gradual en el tiempo (Maneewan, 2002; Dear et al., 2002).

En los suelos provenientes de praderas que se están incorporando a cultivos y presentan problemas de sulfatación y acidez en el área del Distrito de riego del Alto Chicamocha, se ha generalizado la aplicación de materiales encalantes en dosis entre 5 y 10 t·ha<sup>-1</sup>, desconociendo que, por su grado de evolución, algunas unidades de SSA, como los Sulfic Endoaquepts y Typic Sulfhemists, podrían requerir menores cantidades. Por ello, esta investigación contempló dentro de sus objetivos la comprobación de la relación entre los estados de sulfatación y el manejo de la acidez, definiendo los requerimientos de cal en términos de EQ CaCO<sub>3</sub> para obtener dosis óptimas de neutralización de la acidez intercambiable y soluble. Las necesidades de cal expresadas en EQ CaCO<sub>3</sub> permiten controlar la acidez hasta el nivel tolerado por el cultivo, buscando balancear las bases del suelo a través de la combinación de materiales encalantes portadores de calcio, magnesio y fósforo.

El tiempo de reacción de la cal es otro componente importante que permite analizar los cambios ocurridos en el suelo a medida que se dan las reacciones de neutralización. Esto lleva a definir el momento más apropiado para la siembra de los cultivos, una vez se haya llegado a los niveles de control de la acidez que aseguren la sostenibilidad de la corrección.

La elaboración de curvas de encalamiento enfrentadas a parámetros químicos que interfieren en el manejo de la acidez en SSA permite evaluar en intervalos de tiempo los cambios químicos inducidos al suelo por efecto del encalamiento (EQ CaCO<sub>3</sub>). Este análisis es de gran utilidad para definir programas de manejo y control de la acidez en las cinco unidades de SSA, diferenciadas espacialmente en el estudio semidetallado de suelos sulfa-

tados ácidos del Distrito de riego del Alto Chicamocha (GISSAT, 2004) y con diferentes estados de acidificación o degradación química en cada una de ellas.

La presente investigación se desarrolló durante el segundo semestre de 2005 en el laboratorio de Suelos y Aguas del Programa de Ingeniería Agronómica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), en Tunja y forma parte de los estudios básicos sobre control de acidez en SSA realizados por el Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales (GISSAT).

## Materiales y métodos

Una vez culminado el estudio semidetallado de los SSA del Distrito de riego del Alto Chicamocha (GISSAT, 2004-2005), con el que fue posible definir cartográficamente, con fines de manejo y rehabilitación, cinco perfiles modales con diferentes grados de acidez y sulfatación, se consideró apropiado y necesario evaluar las necesidades de encalamiento, en términos de  $\text{EQ CaCO}_3$ , para lograr niveles de neutralización de la acidez favorables al crecimiento de cultivos.

Los suelos en estudio se distribuyen a lo largo del Distrito de riego del Alto Chicamocha, afectan en diferente grado cerca de 3.000 ha y taxonómicamente se encuentran clasificados de acuerdo al Soil Survey Staff (2003) como: Typic Sulfohemists, familia ferrihúmica, dísica, isomésica, micro, (fase ultraácida, encharcable); Typic Sulfihemists, familia dísica, isomésica, shallow, (fase salina sódica y encharcable); Terric Sulfosaprist, familia ferrihúmica, dísica, isomésica, micro, (fase ultraácida, ligeramente salina); Typic Sulfaquepts, familia muy fina

sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica, (fase superficial), y Sulfic Endoaquepts, familia muy fina sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica, (fase moderadamente profunda).

Para evaluar la capacidad de neutralización promovida por el encalamiento, se tomaron muestras de la capa arable (0-25cm) en cada uno de los cinco perfiles modales de SSA caracterizados, siguiendo las recomendaciones de Arhen (2004) y Dear et al., (2002). Mediante un diseño completamente aleatorio, se definieron siete tratamientos (dosis de  $\text{CaCO}_3$  puro,  $\text{EQ} = 100$ ) con tres repeticiones (tabla 1), teniendo en cuenta resultados de pruebas preliminares sobre encalamiento obtenidos por GISSAT entre 2000 y 2004.

Cada unidad experimental, representada por 200 g de suelo a capacidad de campo, se sometió a pruebas de incubación en laboratorio una vez adicionada las dosis de cal, expresadas en  $\text{EQ CaCO}_3$  y correspondientes a cada tratamiento. El proceso de incubación se llevó a cabo a temperaturas de 25 °C, manteniendo el suelo a capacidad de campo durante 45 días en recipientes plásticos heréticamente sellados. Para estimar la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  de 100% de pureza, se tuvieron en cuenta la humedad inicial del suelo para llevarlo a capacidad de campo y los valores de densidad aparente (método del cilindro).

Para monitorear los cambios inducidos al suelo por efecto del encalamiento (control de la acidez), se realizaron evaluaciones de los parámetros químicos: pH (método potenciométrico, relación suelo agua 1:1), acidez intercambiable (método de Yuang, KCl 1N) y azufre soluble como sulfatos (método del fosfato monocálcico,

Tabla 1. Definición de tratamientos experimentales y cálculo de dosis de  $\text{CaCO}_3$  según valores de densidad aparente en capas arables de perfiles modales.

Tratamiento	Dosis $\text{CaCO}_3$ ( $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ )	Unidad experimental (g $\text{CaCO}_3$ por 200 g de suelo)				
		Typic Sulfohemist	Terric Sulfosaprist	Sulfic Endoaquept	Typic Sulfaquept	Typic Sulfihemist
1	0	0	0	0	0	0
2	5	0,60	0,42	0,5	0,46	2,17
3	10	1,21	0,84	1,0	0,93	4,34
4	15	1,80	1,27	1,5	1,40	6,52
5	20	2,4	1,69	2,0	1,86	8,7
6	25	3,0	2,11	2,5	2,33	10,8
7	30	3,60	2,54	3,0	2,80	13,04
	$d_a$ ( $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ )	0,82 (Aj)	1,18 (Aj)	1,01 (Ap)	1,07 (Ap)	0,23 (Ogy)

$d_a$ , densidad aparente; Aj, horizonte superficial con presencia de jarosita; Ap, horizonte superficial disturbado; Ogy, horizonte orgánico gleysado yesífero

medición por colorimetría-espectrofotometría); a los 15 y 30 d después del enclamiento (dde). Culminado el experimento a los 45 dde, además de los parámetros anteriores, se determinaron Ca, Mg, K y Na por el método del acetato de amonio 1N, pH 7, absorción atómica (United States Department of Agriculture, 1990), con el fin de comparar esta información con las condiciones originales del suelo. Para interpretar el efecto del enclamiento suministrado al suelo mediante dosis graduales de  $\text{CaCO}_3$  puro, se representó gráficamente el efecto independiente y de las interacciones del enclamiento sobre cada uno de los parámetros químicos más representativos de la acidez en los SSA (pH, Al y S). Los resultados obtenidos en la presente investigación fueron sometidos a análisis estadístico (Anova) y a pruebas de significancia (Tukey).

## Resultados y discusión

### Indicadores de acidez y sulfatación

Si se analizan las condiciones iniciales de los SSA del estudio (tabla 2), se observa que el pH, el aluminio de cambio ( $\text{Al}^{+3}$ ) y el azufre (S) son indicadores importantes en el diagnóstico de la acidez y del estado de sulfatación en los SSA. De acuerdo con la similitud y tendencia de estos parámetros químicos, es posible diferenciar claramente dos grupos de SSA clasificados según sus procesos en estudios previos del GISSAT (2004) y Gómez (2006). Para facilitar la discusión de los resultados se hace referencia a estas dos categorías:

- SSA actuales oxidados (Typic Sulfohemists, Terric Sulfosapristis y Typic Sulfaquepts), que coinciden con una reacción ultra ácida a extremadamente ácida (pH 3,1-4,0), altos niveles de Al ( $> 5 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$ , con saturaciones superiores al 30%) y concentraciones excesivas del S disponible ( $> 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); parámetros

que en conjunto indican limitaciones en la productividad para la explotación agrícola, como lo corroboran las experiencias de Maneewan (2002) y estudios sobre parámetros de identificación de los SSA realizados por Gómez y Castro (2004). Dentro de este grupo de los SSA actuales oxidados, los Typic Sulfohemists y los Terric Sulfosapristis se consideran como SSA de origen orgánico, mientras que los Typic Sulfaquepts corresponden a suelos SSA de origen mineral (tabla 2).

- Suelos pseudosulfatados ácidos (Typic Sulfihemist y Sulfic Endoaquepts), en los que predominan procesos de auto-neutralización, evidenciados por la presencia de yeso en forma de cristales a través del perfil (Nettleton et al., 1982; Dent, 1986; Gómez, 2006). Estos suelos se caracterizan por presentar una reacción fuertemente ácida (pH  $> 4,0$ ) y saturaciones de Al menores al 30% (tabla 2). Aunque presentan niveles excesivos de S bajo condiciones pseudosulfatadas, estas formas aparecen neutralizadas por las altas concentraciones de calcio y la formación de yeso, fenómeno que indica un impacto menor sobre la productividad del suelo por procesos de sulfatación y un mejor desarrollo de los cultivos. Los mayores factores limitantes en este tipo de suelos son las concentraciones altas de sales solubles ( $\text{CE} > 4,0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ) y las saturaciones altas de sodio ( $> 15\%$ ), por efecto de aguas freáticas cargadas de sulfatos de calcio y sodio en áreas depresionales, como se ha comprobado en estudios de aguas sulfatadas hechos por Castro y Gómez (2002), Muñoz y Muñoz (2005) y Gómez (2006).

### Comportamiento del pH en la incubación con $\text{CaCO}_3$

Al evaluar esta variable una vez finalizada la incubación, se observó que existían diferencias altamente significativas ( $P < 0,001$  y cv entre 1,8% y 4,0%) del pH res-

Tabla 2. Caracterización química inicial de los perfiles modales de suelos sulfatados.

Perfil SSA	pH	% MO	$\text{cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$						$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$						$\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$	%		
			Al	Ca	Mg	K	Na	ClC	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn		B	CE	Al
Typic Sulfohemists	3,2	24,0	9,0	1,5	0,3	0	0,2	11,0	8,9	785	97	4,2	0,3	2,4	0,4	3,2	82	1,8
Typic Sulfaquepts	3,5	14,2	7,5	3,3	0,4	0,1	0,2	11,5	27	417	121	2,9	0,3	1,4	0,2	2,0	65	1,7
Terric Sulfosapristis	3,1	23,0	5,8	6,8	1,3	0,1	3,5	17,5	8,4	478	104	9,2	0,4	1,5	0,5	4,7	33	20
Typic Sulfihemists	4,5	45,0	2,8	32,0	1,9	0,4	7,0	44,1	5,5	546	124	3,0	0,3	1,1	1,7	5,1	6,3	16
Sulfic Endoaquepts	4,1	12,7	2,6	10,0	1,4	0,3	4,3	18,6	10	593	127	2,8	0,4	2,2	0,5	4,7	14	23

SSA, suelos sulfatados ácidos; MO, materia orgánica; CE, conductividad eléctrica

pecto a la aplicación de las dosis evaluadas de  $\text{CaCO}_3$  en todas las épocas. Al construir las curvas de encalamiento y pH en cada uno de los perfiles, se corroboró una alta correlación estadística, en la que las mayores dosis de  $\text{CaCO}_3$  para llegar a un pH determinado coinciden con los SSA actuales oxidados (Terric Sulfosaprists, Typic Sulfaquepts y Typic Sulfohemists). Para obtener suelos con pH mayores a 5,0 –considerados después de la corrección como suelos mejorados–, se requieren aplicaciones del orden de  $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  para los SSA actuales oxidados de origen mineral (Typic Sulfaquepts) y de  $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  para los SSA actuales oxidados de origen orgánico (Terric Sulfosaprists y Typic Sulfohemists) (figura 1a). Las altas dosis de encalamiento requeridas para superar la acidez extrema de estos suelos son consecuencia de su alta capacidad buffer ocasionada por el tipo de material constitutivo y los procesos de sulfatación (Dear, et al; 2002; Ludwig et al, 1999; Fitzpatrick et al, 2002).

Deotrolado, los suelos pseudosulfatados ácidos, como los Typic Sulfihemist y Sulfic Endoaquept, con alta capacidad de auto-neutralización, presentan una respuesta más eficiente al encalamiento, lo que se refleja en menores requerimientos de encalamiento (alrededor de  $1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  para alcanzar pH mayores a 5,5) (figura 1b). A medida que se incrementan estas dosis, se logra esta-

bilizar el pH hasta 7,0, indicando que la alta carga de sulfatos y hierro en suelos pseudosulfatados ejerce una auto-neutralización con formación conjunta de yeso e hidróxidos de Fe y Al, fenómeno específico para los SSA (Fink, 1972; Dent, 1986). Estos resultados corroboran la existencia de los dos estados de sulfatación en los grupos de suelos referidos arriba, aspecto muy relacionado con el estado de degradación y la alta capacidad de regulación del sistema que generan las formas sulfatadas en estos suelos.

#### Comportamiento del Al de cambio en la incubación con $\text{CaCO}_3$

El mayor efecto esperado del encalado en los SSA es el logro de una reducción considerable en la solubilidad del  $\text{Al}^{+3}$  (acidez intercambiable); este elemento, aun cuando esté presente en bajas concentraciones, es tóxico para la mayoría de las plantas (Bloomfield y Coulter, 1973). Además su alta concentración, en medios fuertemente ácidos inhibe la absorción de Ca, Mg y K (Espinosa y Molina, 1999). De acuerdo con las muestras estudiadas, se observó que el  $\text{Al}^{+3}$  domina la acidez intercambiable por encima del  $\text{H}^+$ , a pesar de presentar pH menores a 3,5; esto se explica por la solubilidad iónica y los productos de hidrólisis de este metal en medios sulfatados (Frink, 1972; Fitzpatrick et al., 2002).

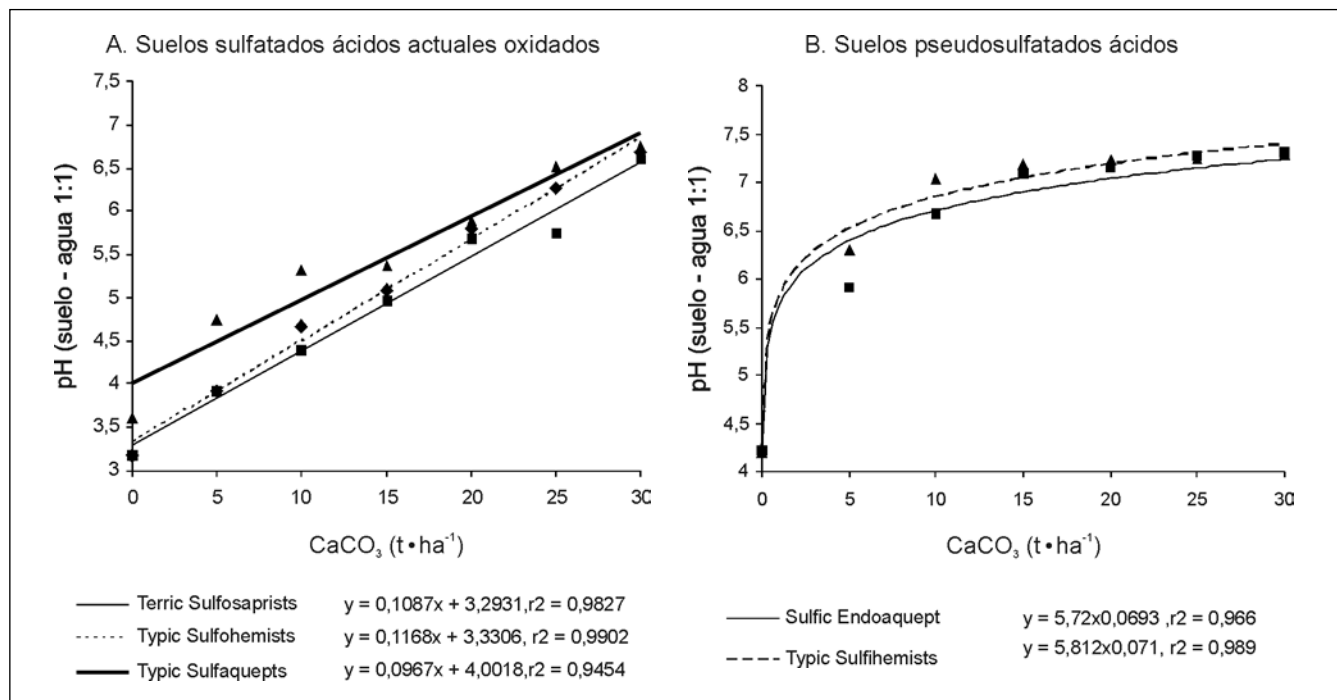


Figura 1. Comportamiento del pH frente al control de acidez derivado del encalamiento en suelos sulfatados ácidos actuales oxidados (SSA) y pseudosulfatados ácidos.

El Al en los SSA presentó diferencias altamente significativas, respecto a las dosis de  $\text{CaCO}_3$  ( $P < 0,01$  y  $cv$  de 15%), con una correlación significativa inversa en relación al pH. Los SSA actuales oxidados en su estado natural presentan niveles de Al superiores a  $5 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; encalarlos utilizando dosis del orden de  $12 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ CaCO}_3$  permite disminuir la concentración de Al a niveles de  $1 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$  (figura 2a). Debe señalarse que, con esta dosis, los valores de pH a los cuales se obtiene tan significativa disminución en la concentración del Al se encuentran alrededor de 4,5, para los SSA actuales orgánicos (Terric Sulfosaprists y Typic Sulfohemists) y de 5,0, para los SSA minerales (Typic Sulfaquepts), como se muestra en la figura 1a. El anterior análisis debe considerarse como muy importante a la hora de tomar decisiones sobre el manejo y control de la acidez de estos suelos. En contraste, en el caso de los pseudosulfatados ácidos (Typic Sulfihemists y Sulfic Endoquepts) –considerados con un menor impacto de la acidez, gracias a su poder de auto-neutralización– para lograr pH mayores a 5,0 y disminución de la concentración de Al a niveles inferiores a  $1 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$ , sólo se requiere alrededor de  $1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  (figura 2b). La menor cantidad de enmienda necesaria en el control de la acidez de los suelos pseudosulfatados corrobora su menor estado de degradación por causa de procesos oxidativos de sulfatación (figura 1b).

Con el fin de aproximar de manera más práctica y consistente los resultados de esta investigación al con-

trol de la acidez en los SSA, es conveniente analizar las figuras 3a y 3b, en las que se expresa la interacción del pH con la saturación de Al en los dos grupos de SSA estudiados. La interpretación gráfica de esta información permite deducir que los SSA actuales oxidados, en su mejor nivel de recuperación y control de acidez, requieren alrededor de  $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  para neutralizar la totalidad del  $\text{Al}^{+3}$  de cambio y lograr un pH en el rango 5,0-5,5. Igualmente es posible inferir, a partir del punto de intersección de las dos curvas, que un primer estado de recuperación agrícola de estos suelos se obtiene con la aplicación de  $7,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ , necesaria para alcanzar un pH de 4,5 con saturaciones de Al del 25%. Para estos suelos esta condición permite el paso de áreas escaldadas improductivas a áreas recuperadas productivas, aspecto ampliamente validado por GISSAT durante el período 2000-2006.

En contraste, las necesidades de encalamiento para habilitar agrícola mente los suelos pseudosulfatados ácidos son considerablemente menores, al comprobarse que con dosis de  $2,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  es posible neutralizar la totalidad del Al y lograr un pH en el rango ideal de 5,0 a 5,5. 14.

Comportamiento del S en la incubación con  $\text{CaCO}_3$

Como un aporte sustancial a la investigación sobre el control de la acidez en los SSA, aparece de manera con-

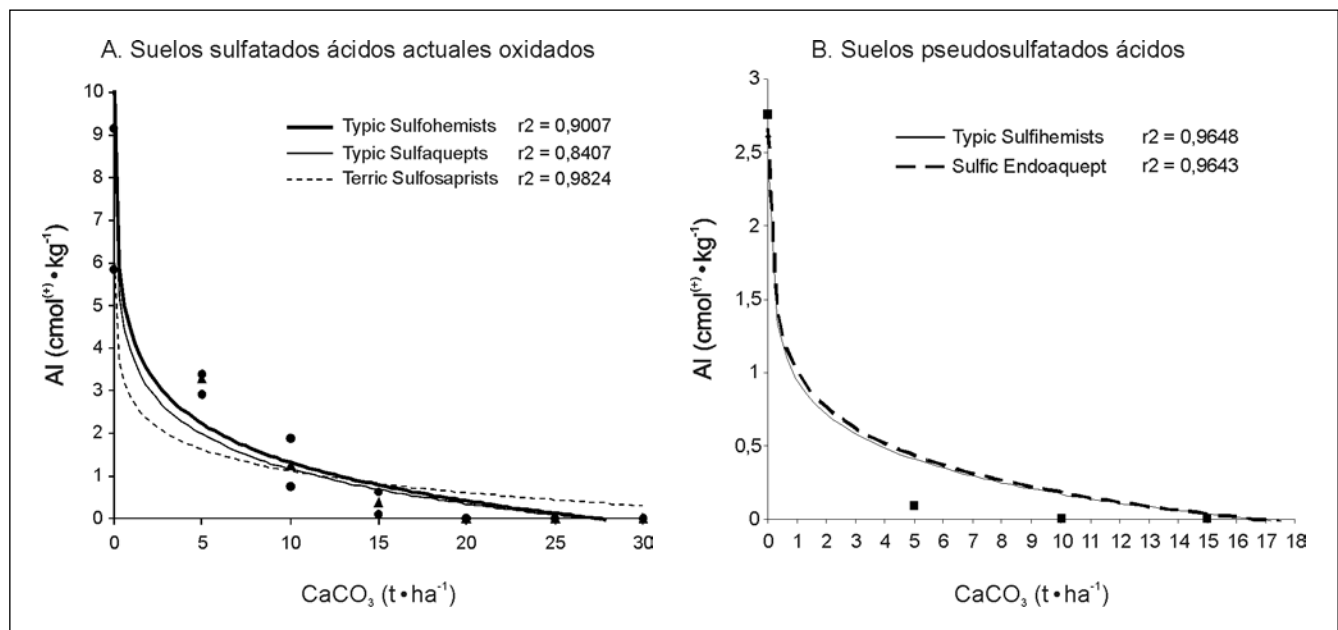


Figura 2. Comportamiento del aluminio frente al control de acidez derivado del encalamiento en suelos sulfatados ácidos actuales oxidados y pseudosulfatados ácidos.

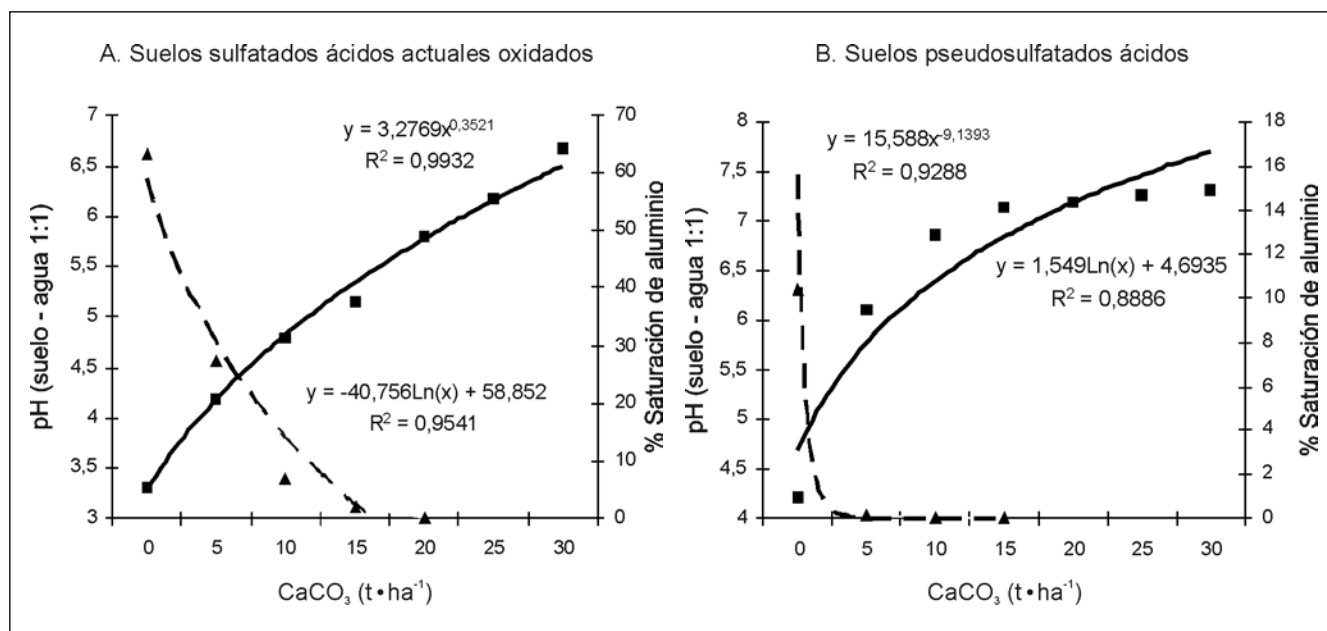


Figura 3. Interacción pH - saturación de aluminio (%), como producto del encalamiento en los grupos de suelos sulfatados ácidos actuales oxidados y pseudosulfatados ácidos.

sistente la tendencia marcada a la disminución del S en solución, por causa de la práctica de encalamiento (figura 4). Esta evidencia, encontrada por primera vez, valora aun más el significado del encalamiento como una práctica que responde de modo integral al control de la acidez; dicho de otra manera, se comprueba que a través del encalamiento, además de incrementar el pH y neutralizar el Al<sup>3+</sup> intercambiable, es posible mitigar considerablemente el efecto tóxico de las concentraciones altas de S en estos suelos, como consecuencia de la neutralización de las formas solubles del S por parte del

Ca, producto de la disolución de los carbonatos suministrados por encalamiento.

Al analizar las tendencias de la interacción S-pH, se demuestra que con dosis entre 10 y 15 t·ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> es posible mitigar las concentraciones de S, logrando niveles moderadamente tolerables para las plantas a pH ligeramente ácidos (figura 4). Igualmente, queda claro la necesidad de ampliar el estudio sobre la dinámica del S en el proceso de su neutralización vía encalamiento, teniendo en cuenta que, a partir de 15 t·ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub>, la curva del S presenta una tendencia polinomial de cuarto orden que refleja nuevos incrementos de este elemento en la solución del suelo, sin variaciones significativas del pH, lo que explicaría una eventual restitución de la acidez con el tiempo, causada por el S en estos suelos.

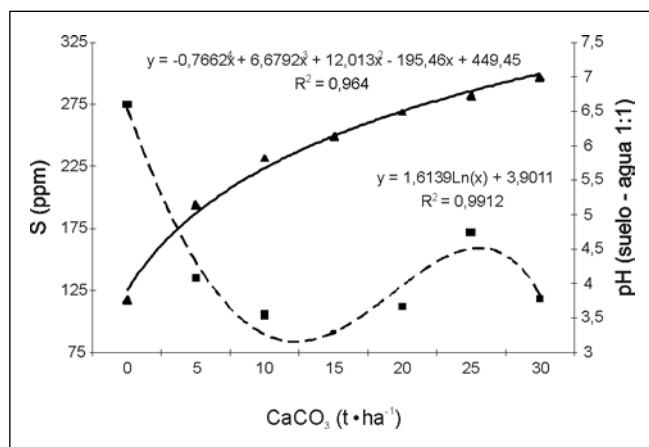


Figura 4. Tendencia en el comportamiento del azufre y su interacción con el pH, como producto del encalamiento en SSA (oxidados y pseudosulfatados).

Comportamiento del pH, Al y S según el tiempo de reacción del CaCO<sub>3</sub> en pruebas de incubación

Al reunir la totalidad de la información experimental aplicada a los parámetros de pH, Al y S en los diferentes SSA estudiados (SSA actuales oxidados y pseudosulfatados), es posible conocer, independientemente de la dosis de encalamiento, la tendencia de los cambios ocurridos con el tiempo de reacción del CaCO<sub>3</sub>, a estos indicadores de acidez.

Al observar la figura 5, se aprecia que 15 días después de incorporado el  $\text{CaCO}_3$ , los SSA presentan los mayores cambios químicos en el control de su acidez; para esta época se muestran correcciones significativas a los valores de pH y disminuciones considerables en las concentraciones de  $\text{Al}^{+3}$  intercambiable y S en solución, condiciones que promueven la habilitación agrícola de áreas originalmente improductivas o con severas limitaciones. El nivel de los cambios inducidos al suelo por efecto del encalamiento a los 15 días, se mantiene 30 y 45 días para pH y  $\text{Al}^{+3}$ , con ligeras variaciones en las concentraciones de S.

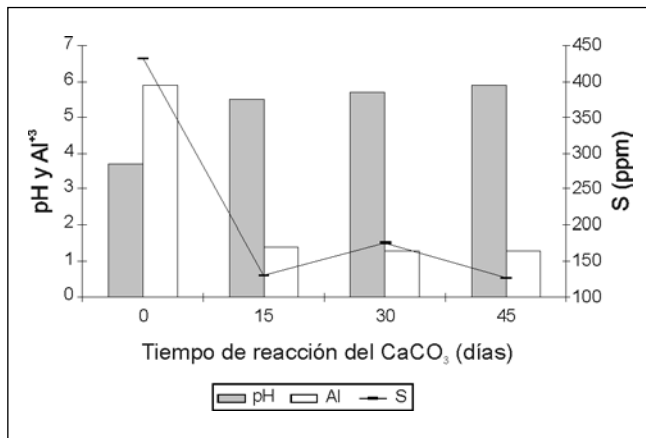


Figura 5. Tendencia de los cambios inducidos al pH, aluminio y azufre con el tiempo de pH y  $\text{Al}^{+3}$ .

En consecuencia, para hacer una recomendación práctica sobre el control de la acidez en SSA se sugiere que el tiempo mínimo de reacción de la enmienda, en condiciones ideales de humedad de campo, no sea inferior a 30 días, siempre y cuando se haga una distribución uniforme y una incorporación profunda del correctivo.

## Conclusiones y recomendaciones

Los resultados encontrados en la presente investigación permiten llegar a las siguientes conclusiones:

- Las pruebas de incubación en el laboratorio demostraron ser una metodología eficiente para definir, a partir de dosis crecientes de  $\text{CaCO}_3$ , los requerimientos de encalamiento para controlar la acidez en los SSA (SSA actuales oxidados y pseudosulfatados). Estos resultados deben ser validados en campo.
- Las necesidades de encalamiento, expresadas en términos de  $\text{CaCO}_3$  de 100% de pureza, se pueden conver-

tir a los términos de materiales encalantes comerciales de composición conocida, haciendo el cálculo del equivalente químico para este tipo de enmiendas. De esta manera, el estudio propone un manejo integral del control de la acidez, factible a partir del cálculo de la equivalencia química en  $\text{CaCO}_3$  y de la combinación de varios materiales encalantes de alta reactividad, garantizando además un balance adecuado de bases y fósforo, en especial de este último cuando se utilicen rocas fosfóricas y escorias Thomas.

- Con fines de manejo y extrapolación agrotecnológica de los programas para el control de acidez en SSA del Distrito de riego del Alto Chicamocha, se concluye que para obtener suelos con pH mayores a 5,0 –considerados después de la corrección como suelos mejorados– se requieren aplicaciones de  $\text{CaCO}_3$  del orden de  $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  para SSA actuales oxidados de origen mineral (Typic Sulfaquepts) y de  $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  para SSA actuales oxidados de origen orgánico (Terric Sulfosaprists y Typic Sulfohemists). En contraste, para los suelos pseudosulfatados ácidos (Typic Sulfihemists y Sulfic Endoaquepts), considerados con menor impacto de la acidez por su poder de auto-neutralización, sólo se requiere alrededor de  $1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$   $\text{CaCO}_3$  para lograr pH mayores a 5,0 y disminuir la concentración de Al hasta niveles inferiores a  $1 \text{ cmol}^{(+)} \cdot \text{kg}^{-1}$ .
- Si se considera la neutralización total del  $\text{Al}^{+3}$  de cambio, los SSA actuales oxidados en su mejor nivel de recuperación y control de acidez requieren alrededor de  $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  para neutralizar la totalidad del  $\text{Al}^{+3}$  de cambio y lograr un pH en el rango de 5,0-5,5. En contraste, las necesidades de encalamiento de los suelos pseudosulfatados ácidos son considerablemente menores, al comprobarse que con dosis de  $2,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  es posible neutralizar la totalidad del Al y lograr un pH en el rango ideal de 5,0 a 5,5.
- Como aporte sustancial a la investigación en el control de la acidez en los SSA, se encontró una tendencia marcada a la disminución del S en solución, debida al encalamiento. Esto ocurrió principalmente en el caso de aplicaciones de 10 y  $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ , en las que, a pH ligeramente ácidos, se logró mitigar la concentración de S hasta niveles moderadamente tolerables para las plantas.
- Como recomendación práctica sobre el control de la acidez en los SSA, se sugiere que el tiempo mínimo de reacción de la enmienda en condiciones ideales de



humedad de campo no sea inferior a 30 días, siempre y cuando se haga una distribución uniforme y una incorporación profunda del correctivo.

## Literatura citada

- Ahern, C.R., A.E. Mc Elnea y L.A. Sullivan. 2004. Acid sulfate soils laboratory methods guidelines. Queensland Department of Natural Resources, Mines and Energy, Indooroopilly, Queensland (Australia). 132 p.
- Bloomfield C. y J.K. Coulter. 1973 Genesis and management of acid sulfate soil. *Advances in Agronomy* 25(1), 265-326.
- Bello, F. y M. Gómez. 2001. Recuperación de suelos sulfatados ácidos en el Distrito de riego del Alto Chicamocha, Boyacá. Trabajo de grado. Programa de Ingeniería Agronómica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Tunja. 190 p.
- Castro, H.E. y M.I. Gómez. 2002. Caracterización fisicoquímica de aguas freáticas superficiales y su relación con suelos sulfatados ácidos. Informe técnico. Proyecto UPTC-GISSAT, Tunja. 21 p.
- Dear, S.E., N.G. Moore, S.K. Dobos, K.M. Watling y C.R. Ahern. 2002. Soil management guidelines. En: Queensland acid sulfate soil technical manual. Department of Natural Resources, Mines and Energy, Indooroopilly, Queensland (Australia). 71 p.
- Dent, D. 1986. Acid sulphate soils: a baseline for research and development. International institute of land reclamation and improvement. Publication 39. Wageningen. 204 p.
- Espinosa. J. y E. Molina. 1999. Acidez y encalado de los suelos. Instituto de la Potasa y el Fósforo, Quito. 37 p.
- Fitzpatrick, R.W., M. Skwarnecki, M. Raven, R. Merry y E. Bonifacio. 2002. Biogeochemical and mineralogy processes in acid sulfate soil: implication for environmental significance. Symposium N° 63, Paper N° 2036. 17th World Congress Soil Science, Thailand.
- Frink, C.R. 1972. Aluminum chemistry in acid sulphate soil. Technical report. The Connecticut Agriculture Experiment Station, New Haven, CT. 49 p.
- Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales (GISSAT). 2004. Caracterización de la problemática de suelos sulfatados ácidos improductivos y evaluación del manejo para su habilitación agrícola. Proyecto UPTC, Colciencias y Usochicamocha, Tunja. 23 p.
- Gómez M.I. y H. Castro. 2004. Parámetros de formación e identificación in situ de suelos sulfatados ácidos (SSA) continentales en el Distrito de riego del Alto Chicamocha. Informe técnico. Proyecto Colciencias, UPTC y GISSAT, Tunja. 24 p.
- Gómez, M.I. 2006. Génesis de suelos sulfatados ácidos y su relación con el manejo agrícola. Distrito de riego del Alto Chicamocha, Departamento de Boyacá. Trabajo de grado. Programa de maestría en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 211 p.
- Gómez M.I., H. Castro y W. Pacheco. 2005. Recover and management of actual acid sulphate soil in Boyacá (Colombia). *Agro-nomía Colombiana* 23 (1), 128-135.
- Maneewan, M. 2002. Application of lime and N-P-K fertilizer for chilli on Rangsit soil series-very acid phase. Symposium 63, 17th World Congress Soil Science, Thailand. 6 p.
- Muñoz, A. y L. Muñoz. 2005. Evaluación de impacto ambiental de los suelos sulfatados ácidos sobre la calidad fisicoquímica de las aguas de drenaje y diagnóstico de manejo. Distrito de riego del Alto Chicamocha, Boyacá. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de la Salle, Bogotá. 279 p.
- Nettleton W.D., R.E. Nelson, B.R. Brasher y P.S. Derr. 1982. Gypsiferous soil in the Western United States. pp. 147-169. En: Acid sulfate weathering. Soil Science Society of America. Special publication N° 10. Madison, WI.
- Rosicky, M.A., L.A. Sullivan y P.G. Slavich. 2004. Factor contributing to the acid soil scalding process in coastal floodplain of New South Wales. *Australian Journal Soil Research* 42, 587-594.
- Soil Survey Staff. 2003. Keys to soil taxonomy. 9th edition. United States Department of Agriculture (USDA), Soil Conservation Service, Blacksburg; [http://soils.usda.gov/technical/classification/tax\\_keys/](http://soils.usda.gov/technical/classification/tax_keys/)
- United States Department of Agriculture (USDA). 1990. Analysis soil handbook. Part 2. Chemical and microbiological properties. 8th edition. United States Department of Agriculture (USDA), Soil Conservation Service, Washington D.C. 1300 p.