

MEJORAMIENTO QUÍMICO DE SUELOS ÁCIDOS MEDIANTE EL USO COMBINADO DE MATERIALES ENCALANTES

CHEMICAL IMPROVEMENT OF ACIDIC SOILS THROUGH THE USE OF COMBINED LIMING MATERIALS

Hugo Castro¹, Óscar Munevar²

¹ I.A., M.Sc., Profesor Titular, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo de Investigación Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales, Gissat-Uptc. Avenida Central del Norte, Tunja, Boyacá, Colombia, hcastrofranco@yahoo.com.mx; ² I.A., Investigador Gissat-Uptc, oscarmunev@hotmail.com

Rev. U.D.CA Act. & Div. Cient. 16(2): 409-416, Julio Diciembre, 2013

RESUMEN

Con el propósito de contribuir, mediante la técnica del encalado, al mejoramiento de la fertilidad química de suelos ácidos del Altiplano Boyacense (Colombia), se estimaron los requerimientos de cal ($\text{t ha}^{-1}\text{CaCO}_3$), para controlar la acidez, a partir de curvas de encalamiento, obtenidas de someter el suelo a pruebas de incubación. Según el carácter ácido del suelo, se exploraron experimentalmente dosis de CaCO_3 , incorporadas en forma pura y mediante combinación de materiales encalantes comerciales (cal viva, dolomita y escorias Thomas), bajo una relación porcentual 50:40:10, respectivamente. Se evaluó el efecto correctivo en dos suelos con diferentes procesos de acidificación: un suelo sulfatado ácido improductivo (SSAI) de origen orgánico y un suelo mineral (Horizonte Óxico). Los parámetros examinados para calificar el grado de mejoramiento químico del suelo fueron pH, Al^{3+} , S y P. Los resultados muestran que los requerimientos de encalado están relacionados directamente con los procesos químicos, que caracterizan la acidez de cada suelo. El mejor efecto correctivo de la acidez, se presentó con $16\text{t ha}^{-1}\text{CaCO}_3$, en SSAI y $4\text{t ha}^{-1}\text{CaCO}_3$, para el suelo de características óxicas, dosis con las cuales fue posible, en los suelos estudiados, neutralizar el aluminio y llevar el pH a valores cercanos a 5,5. Para similares efectos en el control de acidez, disminuyeron las necesidades de encalamiento, cuando las dosis de CaCO_3 exploradas fueron suministradas mediante la combinación de materiales encalantes comerciales; de esta manera, se comprobó la acción más efectiva de las enmiendas complejas en el mejoramiento de suelos ácidos desaturados, limitados en su fertilidad.

Palabras clave: mejoramiento suelos, incubación, encalado, acidez, equivalente químico.

SUMMARY

With the aim of contributing to the improvement of the chemical fertility of the acid soils on the Altiplano Boyacense (Colombia) through liming techniques, the lime ($\text{t ha}^{-1}\text{CaCO}_3$) requirements for controlling acidity were estimated, using liming curves obtained by submitting the soils to incubation tests. According to the acidic character of the soils, CaCO_3 doses were explored in the present study, incorporated in a pure form and combined with commercial liming materials (quicklime, dolomite and Thomas slag) at a ratio of 50:40:10, respectively. The corrective effect was evaluated in two soils with different acidification processes: an unproductive acid sulfate soil (UASS) of an organic origin and a mineral soil (Oxic Horizon). The following parameters were examined to describe the degree of chemical soil improvement: pH, Al^{3+} , S and P. The results demonstrate that liming requirements are directly related to the chemical processes that characterize the acidity of each soil. The two greater corrective effects on acidity were seen with $16\text{t ha}^{-1}\text{CaCO}_3$ in the UASS and $4\text{t ha}^{-1}\text{CaCO}_3$ in the soil with oxic characteristics, doses that were able to neutralize the aluminum in the studied soils and bring the pH to values close to 5.5. While achieving similar effects in the acidity control, the liming requirements were decreased when the studied CaCO_3 doses were applied combined with commercial liming materials; thereby demonstrating the most effective action of the complex supplements in the improvement of the unsaturated acid soils, which have limited fertility.

Key words: Soil improvement, incubation, liming, acidity, chemical equivalent.

INTRODUCCIÓN

Una de las limitaciones más comunes en los suelos colombianos está relacionada con los fenómenos ocurridos por la acidez, lo cual, es consecuencia de la toxicidad generada, principalmente, por el aluminio de cambio y en otros casos, como en los suelos sulfatados ácidos improductivos (SSAI), por la demanda de ácido sulfúrico y hierro. Las interacciones químicas derivadas de la acidez repercuten sobre la fertilidad del suelo, por alterar su equilibrio iónico e inhibir en diferente grado la absorción de importantes nutrientes, como calcio, magnesio y fósforo (Gómez *et al.* 2005).

En zonas agrícolas del Altiplano Boyacense (Colombia), la ocurrencia de diferentes tipos de suelos ácidos obedece a los estados y los procesos de degradación química, involucrados con la génesis de cada suelo (IGAC, 2005). Para los suelos sulfatados ácidos improductivos (SSAI), estos procesos son producto de la oxidación primaria de sulfuros de hierro (FeS_2) y de la generación de ácido sulfúrico, con la consecuente destrucción de minerales primarios e hidrólisis secundaria del aluminio (Dent, 1986). Este cuadro, se evidencia en campo, por la ocurrencia de horizontes sulfúricos y la acumulación de sales sulfatadas metálicas, que originan áreas escaldadas improductivas, como las caracterizadas por Gissat (2006), en el valle de Tundama, Distrito de Riego del Alto Chicamocha. De otra parte, también es frecuente encontrar, superficialmente, horizontes minerales de características óxicas en zonas degradadas del Altiplano, evidenciando suelos altamente meteorizados, con excesos de aluminio y de óxidos de hierro, bajos en materia orgánica, lo que refleja un pobre nivel de fertilidad, comparado con otros suelos de la región (Castro & Gómez, 2010).

Las prácticas de manejo que conllevan al mejoramiento químico de suelos afectados en diferente grado por problemas de acidez deben contemplar el uso de materiales de encalado (Zapata & Restrepo, 2011; Osorno & Osorno, 2011; Oliveira, 2003; Bernal, 2008). Estos materiales que se utilizan como correctivos de acidez son productos comerciales tipificados como fuentes minerales de origen natural o industrial, que portan en su composición carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio o magnesio (Valerio & Molina, 2012). Todos los materiales de encalado difieren en su capacidad de neutralizar la acidez del suelo. Para conocer esta característica, se utiliza el criterio de Efectividad Química, Equivalente Químico (EQ) o Poder de Neutralización, que se define como la capacidad de neutralizar la acidez, que tiene un material con relación al carbonato de calcio (CaCO_3) puro, al cual, se le asigna un valor de 100% (PPIC, 1999; Spera *et al.* 2008).

La elaboración de curvas de encalamiento, enfrentando los parámetros químicos que intervienen en el manejo de la acidez (pH, Al^{3+}), permiten definir dosis óptimas de neutraliza-

ción, que muestran las necesidades de cal expresadas en términos de equivalencia química en CaCO_3 (Castro, 2008; Combatt *et al.* 2009). Este método deducible de pruebas de incubación en laboratorio viene siendo validado y extrapolado a campo, por parte del Gissat, como un enfoque de mayor contenido científico aplicable al manejo de suelos ácidos.

Los requerimientos para la neutralización parcial o total de la acidez pueden ser definidos con un criterio más técnico y preciso, mediante curvas de encalamiento, obtenidas a partir de pruebas de incubación (Alfaro & Bernier, 2008; Epstein & Bloom, 2005). Esta prueba en laboratorio consiste en la adición de dosis crecientes de CaCO_3 expresadas como equivalente químico (EQ), a cantidades constantes de suelo, en donde, como primera medida a la aproximación de las necesidades de encalamiento, se debe tener en cuenta la capacidad buffer del suelo, que puede variar de acuerdo con el material parental, contenido y tipo de arcilla, contenido de materia orgánica y presencia de óxidos e hidróxidos de hierro y de aluminio (Espinosa, 2003).

De acuerdo con las anteriores consideraciones, la presente investigación pretende aportar la experiencia investigativa del Grupo de Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales, Gissat-Uptc, en el tema de control de acidez y mejoramiento de la fertilidad química de suelos ácidos, mediante el uso combinado de materiales encalantes o enmiendas complejas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de evaluar la neutralización de acidez por efecto del encalamiento, se seleccionaron muestras de suelos, a nivel de capa arable (0 – 25cm), de un suelo sulfatado ácido improductivo (SSAI) de origen orgánico, ubicado en el Distrito de Riego del Alto Chicamocha, clasificado taxonómicamente como *Tipyc sulfohemist* y el horizonte óxico de un suelo mineral altamente evolucionado, ubicado en la superficie de un área erosional periurbana, de la ciudad de Tunja. Mediante un diseño completamente aleatorio, aplicado al tipo de acidez de cada suelo, se definieron tratamientos de incubación expresados como dosis de CaCO_3 . Utilizando 4 réplicas por tratamiento, se evaluó, a nivel de invernadero, el efecto de dosis de CaCO_3 puro (EQ = 100) y de dosis de CaCO_3 , producto de la combinación de materiales encalantes comerciales, incluyendo cal viva (75% CaO ; EQ=134), dolomita (55% CaCO_3 + 33% MgCO_3 ; EQ=94) y escorias Thomas (abono paz del río de composición 48% CaO + 1,2% MgO + 10% P_2O_5 ; EQ=89), utilizados en una relación porcentual 50:40:10, respectivamente.

Las dosis exploradas para el horizonte óxico fueron 0,0; 0,5; 1,0; 2,0 y 4,0t ha^{-1} de CaCO_3 puro (EQ=100); la combinación de materiales encalantes contempló dosis de 0,0; 0,5; 1,0; 2,0 y 4,0t ha^{-1} CaCO_3 en relación porcentual 50:40:10.

Adicionalmente, se incluyó un tratamiento satélite de $2t\ ha^{-1}$ $CaCO_3$ relación 50:40:10 + $1t\ ha^{-1}$ de gallinaza, cuyo uso estuvo asociado a la mezcla con escorias Thomas.

Para los suelos sulfatados ácidos improductivos (SSAI), dado su complejo cuadro de acidez ($Al^{3+} + S + Fe$) y experiencias validadas con anterioridad por el Gissat (2006), se seleccionaron dosis más amplias 0; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0; 25,0 y $30,0t\ ha^{-1}$ $CaCO_3$ puro (EQ=100); la combinación de materiales encalantes contempló, para este caso, dosis de 0,0; 2,0; 4,0; 8,0 y $16,0t\ ha^{-1}$ $CaCO_3$. Adicionalmente, se incluyó un tratamiento satélite de $4t\ ha^{-1}$ $CaCO_3$ relación 50:40:10+ $1t\ ha^{-1}$ de gallinaza, cuyo uso estuvo asociado a la mezcla con escorias Thomas.

Siguiendo la metodología propuesta por Dantas *et al.* (2006) y Gómez *et al.* (2007), cada unidad experimental representada por 200g de suelo, se sometió a pruebas de incubación en invernadero, una vez adicionada las dosis de cal expresadas en EQ $CaCO_3$. El proceso de incubación, se llevó a cabo a temperaturas de $25^{\circ}C$, manteniendo el suelo a capacidad de campo durante 45 días, en recipientes plásticos, herméticamente sellados. Para monitorear los cambios químicos inducidos al suelo por efecto del encalamiento, se realizaron evaluaciones a los parámetros de pH, aluminio (Al^{3+}), azufre (S) y fósforo disponible, con el fin de comparar esta información con las condiciones originales del suelo. Teniendo como referente las curvas de encalamiento obtenidas a partir de pruebas de incubación, se extrapolaron a campo los resultados obtenidos para SSAI, donde mediante la técnica de microparcels ($1m^2$ por tratamiento), sugerida por Martini (1996) y utilizando como cultivo indicador *Avena sativa*, se evaluó la interacción de las variables de pH y aluminio (Al^{3+}) en el suelo y la producción de biomasa fresca en plantas.

Con el fin de predecir la respuesta de las variables analíticas (pH, Al^{3+} , S, P) a la aplicación de dosis de $CaCO_3$, suminis-

tradas al suelo en forma pura o como enmienda complejas, se realizó un análisis de regresión para modelar la relación entre estas variables. La agrupación estadística de esta información, se efectuó utilizando el programa SPSS v.17,0.

Los análisis químicos de los suelos estudiados y el monitoreo de los parámetros de tipo experimental (pH, Al^{3+} , S, P), se realizaron, durante el 2011, en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UPTC, siguiendo los métodos y procedimientos estandarizados y recomendados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las condiciones iniciales de los suelos estudiados (Tabla 1), reportaron en su diagnóstico que el pH y el aluminio de cambio (Al^{3+}), son los indicadores de acidez más importantes.

Los suelos minerales de características óxicas presentan reacción muy fuertemente ácida (pH 4,5) y concentraciones de Al^{3+} de $6cmol_c\ kg^{-1}$. Los suelos sulfatados ácidos improductivos (SSAI), se caracterizan por presentar reacción ultra ácida (pH 3,3) y concentraciones de Al^{3+} de $8,5cmol_c\ kg^{-1}$, su estado de sulfatación está relacionado con los altos contenidos de azufre extractable ($275mg\ kg^{-1}$), que al oxidarse a formas de sulfatos, conforman sales metálicas que impiden, junto a la acidez, el crecimiento vegetal. Por las características mencionadas, los suelos estudiados se pueden agrupar dentro de la connotación de suelos álicos (suelos de reacción extremada a fuertemente ácida con presencia de altas concentraciones de aluminio intercambiable) (Castro & Gómez, 2010).

Las curvas de neutralización de acidez elaboradas para mostrar la interacción pH - Al^{3+} con respecto a la aplicación de dosis crecientes de $CaCO_3$ expresado en forma pura, demos-

Tabla 1. Condiciones químicas originales de los suelos estudiados.

| SUELO | pH | MO % | Cmol _c kg ⁻¹ | | | | | | mg kg ⁻¹ | | | | | | Al % | CE dS m ⁻¹ | |
|---|-----|------|------------------------------------|-----|------|------|------|------|---------------------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----------------------|------|
| | | | Al | Ca | Mg | K | Na | CICE | P | S | Fe | Mn | Cu | Zn | | | B |
| Horizonte Óxico | 4,5 | 0,22 | 6,0 | 1,8 | 0,9 | 0,3 | 0,06 | 9,06 | 3,4 | 17 | 139 | 0,9 | 0,01 | 0,9 | 0,04 | 66 | 0,08 |
| Suelo Sulfatado Ácido Improductivo (SSAI) | 3,3 | 30,7 | 8,5 | 0,7 | 0,09 | 0,21 | 0,01 | 9,51 | 12 | 275 | 249 | 9,2 | 0,01 | 3,4 | 0,63 | 89 | 3,4 |

Métodos analíticos: pH (relación 1:1); Al^{3+} (KCl 1N); Materia Orgánica (Walkey-Black); fósforo disponible (Bray II-colorimetría); Ca-Mg-K-Na (extracto $AcNH_4$ -absorción atómica); Fe-Mn-Cu-Zn (formas extractables con DTPA-absorción atómica); Boro (agua caliente); azufre disponible (fosfato monocálcico-colorimetría); Conductividad eléctrica (extracto de saturación-conductivímetro).

traron que para obtener pH cercanos a 5,5 y disminuir la concentración del aluminio de cambio hasta niveles no tóxicos, se requieren aplicaciones de CaCO₃ puro del orden de

4t ha⁻¹, para el horizonte óxico y 15t ha⁻¹, para el caso de los SSAI (Figura 1).

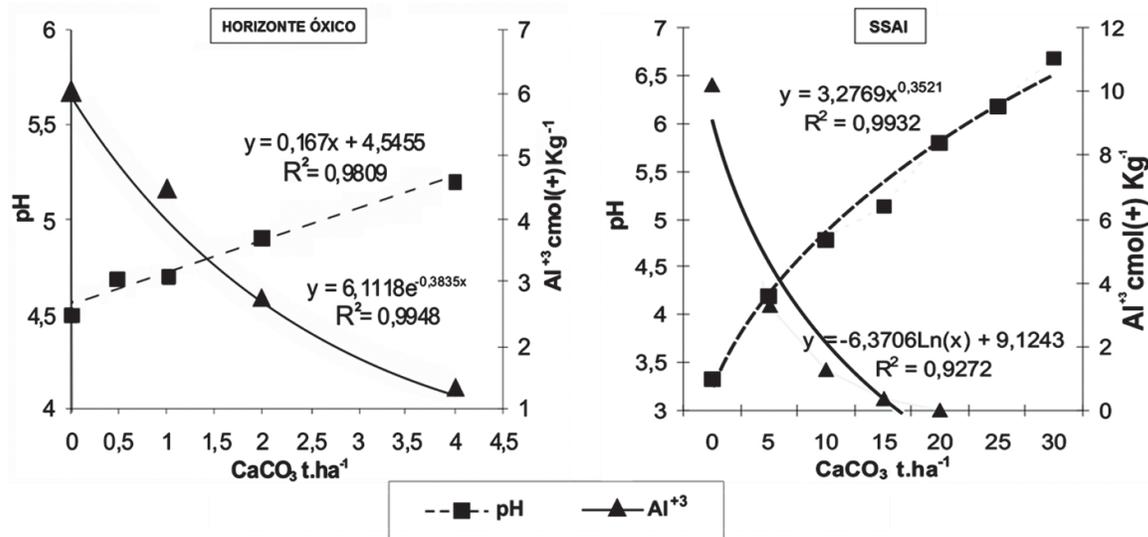


Figura 1. Interacción del pH y el Al³⁺ como producto de la incubación de suelos con dosis crecientes de CaCO₃ puro.

Si se comparan los suelos incubados con CaCO₃ puro (Figura 1) con los incubados, mediante la combinación de materiales encalantes comerciales (cal viva, dolomita y escorias Thomas), en la relación porcentual 50:40:10 (Figura 2), se puede observar que las cantidades de CaCO₃, necesarias para neutralizar el aluminio de cambio en el horizonte óxico, son mucho más bajas cuando se suministra de forma combinada los materiales de encalado. En este caso, con la aplicación de 1t ha⁻¹ de CaCO₃, se logró neutralizar la concentración de Al³⁺ de cambio y obtener valores de pH de 5,5, situación a, la cual, solamente se llegaría con 4t ha⁻¹ de

CaCO₃ puro. Con el uso combinado de materiales de encalado también es posible que con dosis de 2t ha⁻¹ de CaCO₃, se obtenga pH agrícolas de 6,2; sin embargo, se debe resaltar que el objetivo principal del encalado no es elevar el pH sino conseguir la mayor disminución de la concentración del aluminio tóxico, para lograr niveles tolerables por las plantas (Valerio & Molina, 2012). Aunque el pH es un excelente indicador de acidez, este no determina el requerimiento o cantidad de enmienda, ya que únicamente determina la acidez activa sin considerar la acidez potencial, en los coloides minerales y orgánicos del suelo (Espínosa & Gómez, 2005).

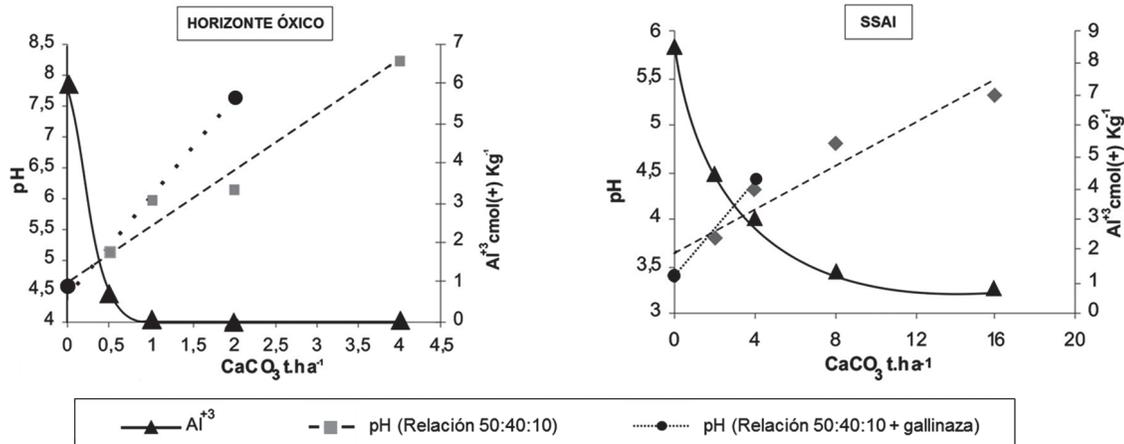


Figura 2. Interacción del pH y el Al³⁺ como producto de la incubación de suelos con dosis crecientes de CaCO₃, incorporadas mediante la combinación de materiales encalantes (cal viva, dolomita y escorias Thomas), bajo una relación porcentual 50:40:10.

Un factor muy importante a tener en cuenta en el control de acidez es el relacionado con el uso de compuestos orgánicos, principalmente estiércoles deshidratados y pulverizados, para ser mezclados con los fosfosilicatos de calcio (tipo escorias Thomas, roca fosfórica), que forman parte de la enmienda compleja. Sobre el particular, se comprobó para el horizonte óxico (Figura 2), que cuando a $1t\ ha^{-1}$ de $CaCO_3$ de la relación 50:40:10 de materiales de encalado, se agrega $1t\ ha^{-1}$ de gallinaza, es posible incrementar el pH de 5,5 hasta 6,0 manteniendo precipitado el aluminio de cambio. De este resultado, se deduce la importancia que representa, agrónomicamente, el uso del componente orgánico dentro de los programas integrales de control de acidez multipropósito (PICAM), tratados por Castro & Gómez (2010).

La interacción del pH y el Al^{3+} en la incubación de suelos sulfatados ácidos improductivos (SSAI) con materiales de encalado suministrados de forma combinada, demostró que para llevar el pH de su estado original (pH 3,3) a valores en el rango de 5,0 – 5,3, se requiere del orden de $16t\ ha^{-1}$ de $CaCO_3$ (Figura 2). Cuando se obtienen estos pH, las concentraciones de Al^{3+} intercambiable pasan de 8,5 a $0,83cmol_c\ kg^{-1}$, lo que representaría en la práctica la restauración agrícola del suelo, desde el punto de vista químico (Gissat, 2006). Se debe resaltar que a dosis de $4t\ ha^{-1}$ de $CaCO_3$, se consiguen cambios químicos importantes, pero no suficientes para contrarrestar la extrema acidez, generada por efecto del aluminio y el azufre, en estos suelos. El rango de 8 a $12t\ ha^{-1}$ de $CaCO_3$, se convierte en la mejor alternativa para el control de la acidez en los SSAI estudiados. Similar a lo ocurrido en el horizonte óxico, la adición de $1t\ ha^{-1}$ de gallinaza a la

relación 50:40:10 de materiales de encalado, permitió que con la aplicación de $4t\ ha^{-1}$ de $CaCO_3$ se registrara, comparativamente, mayores incrementos de pH en SSAI (Figura 2).

Al analizar la interacción azufre (S) – pH en suelos sulfatados ácidos improductivos (SSAI), se demuestra que con dosis entre 10 y $15t\ ha^{-1}$ de $CaCO_3$ es posible mitigar las altas concentraciones de azufre extractable ($275mg\ kg^{-1}$), hasta niveles tolerables para la planta ($75mg\ kg^{-1}$), situación que ocurre cuando, por efecto del encalamiento, el suelo cambia su reacción de extremada a ligeramente ácida (Figura 3). Igualmente, queda claro la necesidad de ampliar el estudio sobre la dinámica del azufre en el proceso de neutralización vía encalamiento, teniendo en cuenta que, a partir de $15t\ ha^{-1}$ de $CaCO_3$, la curva del azufre presenta una tendencia polinomial de cuarto orden, que refleja nuevos incrementos de este elemento, lo que explicaría una eventual restitución de la acidez, causada por el azufre en estos suelos, asunto que se encuentra referenciado por investigadores, como Hicks *et al.* (2009) y Dear *et al.* (2004).

La tendencia a disminuir las concentraciones de azufre por efecto del encalamiento en suelos sulfatados ácidos improductivos (SSAI), valora aún más el significado de esta práctica, al responder, de manera 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 aluminio intercambiable, es posible mitigar el efecto tóxico de concentraciones altas de azufre. Según Dent & Dawson (2000), el efecto tóxico del azufre en SSAI, se mitiga como consecuencia de la neutralización de las formas solubles de

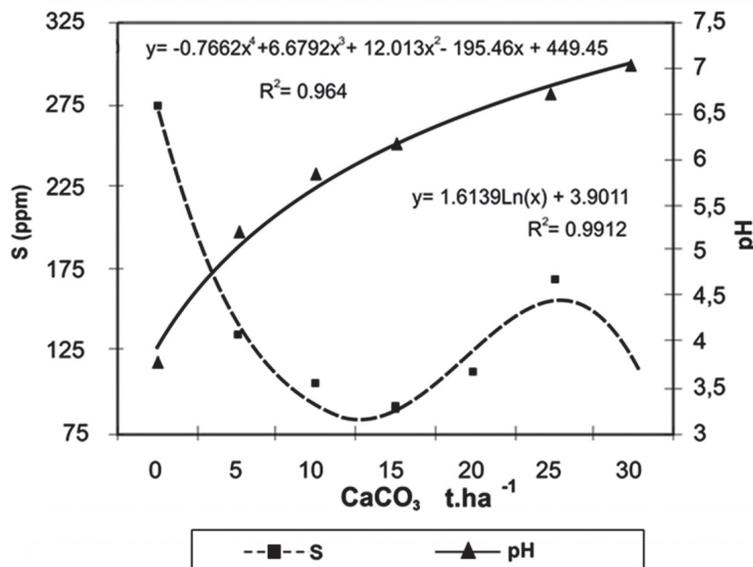


Figura 3. Interacción del pH y el azufre como producto de la incubación de suelos sulfatados ácidos improductivos (SSAI) con dosis crecientes de $CaCO_3$ puro.

azufre (SO_4^{2-}) por parte del calcio, procedente de la disolución de carbonatos suministrados vía encalamiento.

En cuanto a la acción del encalamiento sobre la dinámica del fósforo (Figura 4), se comprobó que en los suelos de carácter óxico los contenidos de fósforo aumentaron respecto a su estado inicial ($3,4mg\ kg^{-1}$), a medida que se incrementó el pH, con el uso de materiales encalantes combinados. Merece atención que en los tratamientos donde no se aplicó fosfosilicatos de calcio (escorias Thomas), es decir, donde se empleó solamente $CaCO_3$ puro, el fósforo se mantuvo cons-

tante. Se registra una mayor respuesta cuando se asociaron los materiales orgánicos (gallinaza) con materiales encalantes portadores de fósforo; en este caso, se incrementó en el horizonte óxico el contenido, hasta $21mg\ kg^{-1}$ de fósforo, a dosis de $2t\ ha^{-1}$ de $CaCO_3$. En los SSAI, se pasa de concentraciones iniciales de $12mg\ kg^{-1}$ a $23mg\ kg^{-1}$ de fósforo, con dosis de $4t\ ha^{-1}$ de $CaCO_3$, suministradas por la relación 50:40:10 + gallinaza. Estos niveles de fósforo ($23mg\ kg^{-1}$), se lograron igualmente cuando se empleó $6t\ ha^{-1}$ de la relación 50:40:10 y con la aplicación de $16t\ ha^{-1}$ de $CaCO_3$ puro.

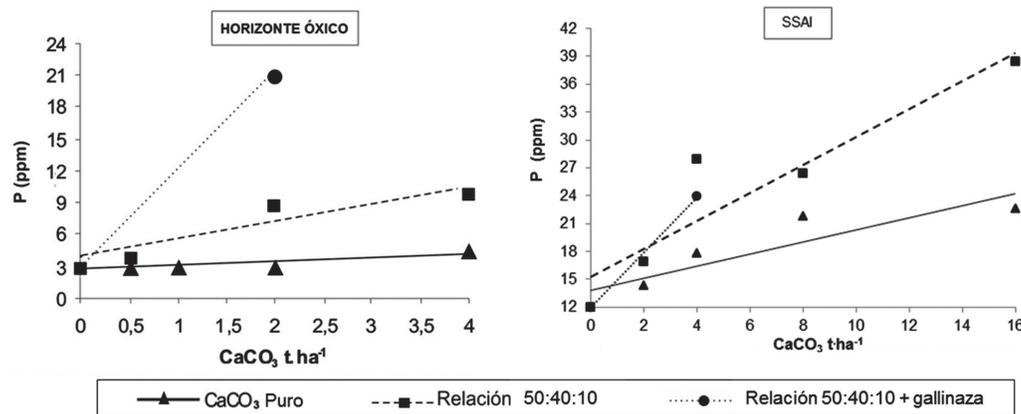


Figura 4. Dinámica del fósforo como producto de la incubación de suelos con dosis crecientes de $CaCO_3$, incorporadas en forma pura y mediante la combinación de materiales de encalado.

Con base en los resultados de pruebas de encalamiento encontrados, a nivel de invernadero, se realizó en campo sobre SSAI un montaje de microparcels ($1m^2$ por tratamiento), donde se exploraron dosis de $CaCO_3$, definidas a partir de la aplicación combinada de materiales encalantes comerciales (cal viva, dolomita y roca fosfórica), en las relaciones porcentuales 50:40:10 (relación 1), 60:30:10 (relación 2) y 70:20:10+ $1t\ ha^{-1}$ de gallinaza (relación 3), utilizando como

cultivo indicador de la recuperación *Avena sativa*. La Figura 5 representa la dosis óptima de neutralización del aluminio, encontrándose que entre 12 y $15t\ ha^{-1}$ en equivalente químico de $CaCO_3$, se obtienen pH cercanos a $5,5$ y concentraciones de Al^{3+} menores a $0,5cmol_c\ kg^{-1}$, lo que indica un efecto correctivo a las condiciones de extrema acidez que, originalmente, caracterizaban a los suelos sulfatados ácidos improductivos (SSAI) del Distrito de Riego del Alto Chicamo-

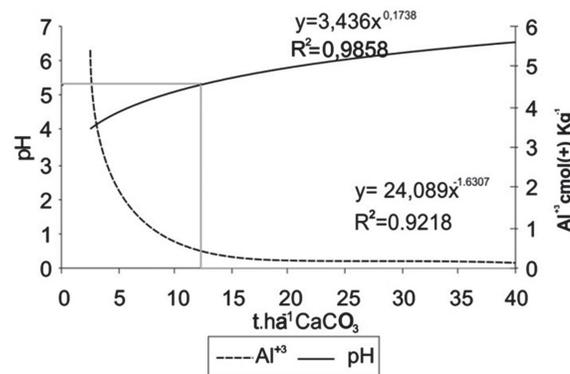


Figura 5. Dosis óptimas de insolubilización de Al^{3+} utilizando *Avena sativa*, como cultivo indicador de recuperación en un suelo sulfatado ácido improductivo (SSAI). Evaluación de campo por técnica de microparcels.

cha (Boyacá). Este resultado correlaciona con lo obtenido para este tipo de suelo en las pruebas de incubación.

La producción de biomasa fresca de *Avena sativa* aumentó a medida que se incrementaron las dosis de CaCO_3 equivalente. La relación 3 (70:20:10 + 1t ha^{-1} de gallinaza) superó las demás relaciones, por presentar mayor poder de neutralización total, derivado de una mayor participación del calcio en los materiales de encalado, que componen la enmienda compleja (Munevar & Pérez, 2006). Con los resultados de producción de biomasa, se ratifica, en pruebas de campo, lo observado en pruebas de incubación, sobre el efecto favorable de la gallinaza cuando se mezcla con materiales encalantes portadores de fósforo, en este caso, roca fosfórica, como componente del 10% de las relaciones estudiadas.

Al reunir la totalidad de la información experimental e interpretar su utilidad práctica, se deduce la importancia y el significado que representa para la agricultura de suelos ácidos el uso del encalamiento, concebido como una técnica orientada desde la presiembra al mejoramiento químico integral de la fertilidad del suelo. En este sentido, los resultados de la presente investigación comprueban que, mediante curvas de encalamiento, es posible definir, de forma óptima, los requerimientos de cal ($\text{t ha}^{-1} \text{CaCO}_3$), para neutralizar parcial o totalmente la acidez, que afecta la productividad de suelos agrícolas.

La aplicación de enmiendas complejas, producto de la mezcla de materiales encalantes de diferente origen, composición y reactividad, hacen más efectivo el proceso del mejoramiento químico de suelos ácidos desaturados, limitados en su fertilidad.

Los procesos químicos que caracterizan la acidez del suelo son determinantes al momento de definir las necesidades de encalamiento. Los suelos minerales de características óxicas ofrecen mayor respuesta a la aplicación de dosis bajas de enmiendas de origen calcáreo, lo que contrasta con las altas necesidades de encalamiento de los SSAI, como consecuencia de la alta capacidad buffer promovida por su carácter orgánico y los procesos de sulfatación propios de la composición de los materiales de origen que conforman estos suelos.

Las pruebas de encalamiento, por métodos de incubación en laboratorio, apoyan decisiones de campo para implementar planes de control de acidez, que mejoran integralmente la fertilidad del suelo, desde la presiembra y antes de proceder al uso de fertilizantes.

Los resultados obtenidos constituyen referentes investigativos susceptibles de extrapolación a suelos ubicados en otras regiones agrícolas del país, con características similares a las estudiadas.

Conflicto de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses, que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALFARO, M.; BERNIER, R. 2008. Enmiendas calcáreas y estimación de dosis de aplicación. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA – Minagricultura. Chile. 50p.
2. BERNAL, J. 2008. Encalado y uso de correctivos del suelo en pastos. En: Pastos y forrajes tropicales. Ed. Rocca. Bogotá (Colombia). p.187-209.
3. CASTRO, H.; GÓMEZ, M. 2010. Fertilidad de suelos y Fertilizantes. En: Ciencia del suelo. Principios Básicos. Eds. Mojica y Burbano. Ed. Guadalupe S.A. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. p.217-303.
4. CASTRO, H. 2008. Actualidad y tendencias del uso de enmiendas calcáreas en Colombia. En: Actualización en fertilización de cultivos y uso de fertilizantes. Soc. Col. de la Ciencia del Suelo. p.141-153.
5. COMBATT, E.; MERCADO, T.; PALENCIA, G. 2009. Alteración química de la solución del suelo sulfatado ácido, con encalamiento y lavado en columnas disturbadas. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. (Colombia) 12(1):23-32.
6. DANTAS, R.; SILVA, J.; CHÁVES, L. 2006. Manejo de solos ácidos: comparação de métodos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do Estado da Paraíba. Rev. Biol. Cienc. Terra (Brasil). 6(1):34-38.
7. DEAR, S.; MOORE, M.; DOBOS, S. 2004. Soil management guidelines. Queensland Acid Sulfate Soil Technical Manual. Department of Natural Resources, Indooroopilly, Australia. 71p.
8. DENT, D.; DAWSON, B. 2000. The acid test. An expert system for acid sulphate soils. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, The Netherlands. 128p.
9. DENT, D. 1986. Acid sulphate soils: a baseline for research and development. International institute for land reclamation and improvement / ILRI, Publication 39. Wageningen, The Netherlands. 204p.

10. EPSTEIN, E.; BLOOM, A. 2005. Mineral nutrition of plants: principles and perspectives. Ed. Sinauer Associates, Inc. Publishers. Sunderland, Massachusetts. 380p.
11. ESPINOSA, J.; GÓMEZ, M. 2005. Conceptos utilizados para diagnosticar integralmente la fertilidad del suelo mediante el uso de indicadores. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 8(2):23-32.
12. ESPINOSA, J. 2003. Encalado de suelos tropicales. Fertilidad de Suelos Tropicales. Ed. Soc. Col. Ciencia del Suelo. Bogotá. p.75-84.
13. GRUPO INTERINSTITUCIONAL DE INVESTIGACIÓN EN SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS TROPICALES, GISSAT UPTC. 2006. Caracterización de la problemática de suelos sulfatados ácidos improductivos y evaluación del manejo para su habilitación agrícola. Uptc, Colciencias, Usocchicamocha. Tunja. 153p.
14. GÓMEZ, M.; CASTRO, H.; MUNÉVAR, O. 2007. Diagnóstico y control de la acidez en suelos sulfatados ácidos mediante pruebas de incubación. *Agr. Col.* 24(1):123-130.
15. GÓMEZ, M.; CASTRO, H.; PACHECO, W. 2005. Recover and management of actual acid sulphate soil in Boyacá (Colombia). *Agr. Col.* 23(1):128-135.
16. HICKS, W.; BOWMAN, G.; FITZPATRICK, R. 2009. Effect of season and landscape position on the aluminium geochemistry of tropical acid sulfate soil leachate. *Soil Res. (Australia).* 47(2):137-153.
17. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI –IGAC-. 2006. Métodos analíticos del laboratorio de suelos, sexta edición. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá. 648p.
18. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI –IGAC-. 2005. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Boyacá. IGAC, Subdirección Agrológica - UPTC. Bogotá. Imprenta Nacional de Colombia. 252p.
19. MARTINI, J. 1996. La microparcela de campo como un método biológico rápido para evaluar la fertilidad del suelo. Centro de Investigación Turrialba – Costa Rica. 16(3):267-270.
20. MUNÉVAR, O.; PÉREZ, C. 2006. Exploración por la técnica de microparcels de la corrección química de los suelos sulfatados ácidos improductivos. Distrito de riego del alto Chicamocha (Boyacá). 62p.
21. OLIVEIRA, J. 2003. Sistema para cálculo de balanço nutricional e recomendação de calagem e edução de povoamentos de Teca – Nutriteca. Universidad Federal de Viçosa. Viçosa, Brasil. 76p.
22. OSORNO, H.; OSORNO, L. 2011. Determinación de los requerimientos de cal. *Suelos Ecuat.* 41(1):29-35.
23. POTASH AND PHOSPHATE INSTITUTE OF CANADA –PPIC-. 1999. Acidez y encalado de los suelos. Canadá. 1a edición. 41p.
24. SPERA, S.; DENARDIN, J.; VARELLA, E.; PEREIRA DOS SANTOS, H. 2008. Dispersão de argila em microgregados de solo incubado com calcário. *Rev. Bras. Ciênc. Solo.* 32(1):2613-2620.
25. VALERIO, J.; MOLINA, E. 2012. Evaluación de una fuente de enmienda líquida en el rendimiento de arroz en un Ultisol de la zona norte de Costa Rica. *Agr. Costarric.* 36(1):86-96.
26. ZAPATA, R.; RESTREPO, F. 2011. Efectos de la adición de cal y yeso como correctores del aluminio del suelo. *Suelos Ecuat.* 41(1):36-45.

Recibido: Diciembre 7 de 2012

Aceptado: Octubre 16 de 2013

Como citar:

Castro, H.; Munevar, O. 2013. Mejoramiento químico de suelos ácidos mediante el uso combinado de materiales encalantes. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 16(2): 409-416.