

MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUAS

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Evaluación de especies vegetales para el manejo de la acidez en suelos sulfatados ácidos de Paipa, Boyacá**Evaluation of plant species for use in the control of acid sulfated soils in Paipa, Boyacá**Andrea Angélica Bernal Figueroa¹, Fabio Emilio Forero Ulloa²¹Bióloga, MSc. Ingeniería Ambiental. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia. anbernal@gmail.com²Ingeniero Agrónomo, MSc. Ciencias Agrarias. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia. guatoquero@gmail.com

Fecha de recepción: 13/02/2014

Fecha de aceptación: 22/08/2014

ABSTRACT

Acid sulfated soils are characterized by high amounts of iron and sulfur, which in presence of air are oxidized and form sulfuric horizons extremely acidic, generating environmental changes ranging from water pollution to problems associated with fertility and crop production, among others. This research was conducted in order to identify suitable plant species to control the acidity of these soils in the town of Paipa, Boyacá, Colombia. A completely randomized experimental design with 6 treatments and 3 replications was implemented in potting shed; there, the response of *Beta vulgaris* L. (forage beet), *Brassica rapa* L. (forage turnip) and *Raphanus sativus* L. (forage radish) on the acidity of sulfated acid soil, contrasted with a non-sulfated soil, was evaluated, after correction with liming. To assess the effects, pH and exchangeable acidity ($H^+ + Al^{+3}$ cmol/kg) were measured in the two types of soil before and after seeding; the agronomic response of plants in each treatment was determined at the end of the growing season (120 days after seeding). On acid sulfated soils, species *B. rapa*, *R. sativus* and *B. vulgaris* along with the complementary use of liming as corrective induced a reduction in exchangeable acidity; *B. rapa* and *R. sativus* showed better growth potential and resistance, while *B. vulgaris* was affected in height and root diameter.

Key words: liming, forage turnips, forage radish, rehabilitation, forage beet, acid sulfated soils.

RESUMEN

Los suelos sulfatados ácidos se caracterizan por contener altas cantidades de hierro y azufre, que en presencia de aire se oxidan y forman horizontes sulfúricos extremadamente ácidos, los cuales generan alteraciones ambientales que van desde la contaminación hídrica hasta problemas asociados con su fertilidad y producción de cultivos, entre otros. Esta investigación se realizó con el fin de identificar especies vegetales adecuadas para el manejo de la acidez de estos suelos en el municipio de Paipa, Boyacá, Colombia. Se implementó bajo cubierta un diseño experimental completamente al azar con 6 tratamientos y 3 repeticiones, donde se evaluó la respuesta de *Beta vulgaris* L. (remolacha forrajera), *Brassica rapa* L. (nabo forrajero) y *Raphanus sativus* L. (rábano forrajero) sobre la acidez de un suelo sulfatado ácido, contrastado con uno no sulfatado, previa corrección con enmienda calcárea. Para estimar sus efectos, se midió pH y acidez intercambiable ($H^+ + Al^{+3}$ cmol/kg) en los dos tipos de suelo, antes y después de la siembra; al finalizar el periodo vegetativo (120 días después de la siembra) se determinó la respuesta agronómica de las plantas en cada tratamiento. En el suelo sulfatado ácido, las especies *B. rapa*, *R. sativus* y *B. vulgaris* junto con el uso complementario de enmiendas calcáreas como correctivo indujeron una reducción en la acidez intercambiable; *B. rapa* y *R. sativus* presentaron mejor potencial de crecimiento y tolerancia, mientras que *B. vulgaris* se vio afectada en altura y diámetro de raíz.

Palabras claves: encalamiento, nabo forrajero, rábano forrajero, rehabilitación, remolacha forrajera, suelos sulfatados ácidos.

INTRODUCCIÓN

Aunque el suelo presenta normalmente un nivel de contaminación más elevado que el agua o la atmósfera, el ser humano le ha prestado históricamente menos atención, a pesar de su papel en la formación y funcionamiento de los ecosistemas terrestres (Campos del Pozo, 2010). El suelo es un recurso no renovable, consistente en un sistema muy dinámico que ejerce muchas funciones y presta servicios vitales para las actividades humanas y la supervivencia (De la Varga, 2009). Sin embargo, se encuentra sometido a constantes cambios por efecto de las variaciones del clima, la atmósfera y la acción misma del hombre (Urquiza, 2002), lo cual genera una de las principales problemáticas en la actualidad: la acidificación de los suelos (Urquiza, 2002).

Los suelos sulfatados ácidos (SSA) son propios de zonas bajas que se inundan con frecuencia o permanecen gran parte del tiempo inundadas; su dinámica es desconocida pero se cree que está en función del azufre (Cabrales, 2007). Se caracterizan por ser sistemas con degradación química continua, a causa de procesos de acidificación actual severa debida a la toxicidad de las diversas formas reducidas del azufre, problemas como las altas concentraciones de aluminio y hierro solubles, producción de ácido sulfúrico, formación de sales, desbalanceamientos nutricionales, poca disponibilidad del fósforo (causado por la formación de fosfato de hierro) y baja saturación de bases (Combatt *et al.*, 2004; GISSAT, 2006; Cabrales, 2007; Hernández y Castro, 2007; Castro y Munévar, 2011; Montaña y Forero, 2013). Estas formas de degradación en el suelo causan raquitismo en las plantas y atrofian su sistema radicular, que al no poder ramificarse reduce su capacidad de absorción de agua y disminuye o detiene su crecimiento (Combatt *et al.*, 2004). A escala mundial, es tal su magnitud que mediante sistemas de información se estima que existe un total de 24 millones de ha de SSA (Dent y Dawson, 2000; Combatt *et al.*, 2003; Cabrales, 2007). En Colombia se encuentran en los departamentos de Córdoba, Bolívar, Cesar, Valle del Cauca y Boyacá principalmente, pero no se conoce su totalidad (Cabrales, 2007; Combatt *et al.*, 2004; Combatt *et al.*, 2006). Específicamente en el departamento de Boyacá se estima que hay alrededor de 3.000 ha de suelos con estas características en el Distrito de Riego del Alto Chicamocha (DRACH) (Pardo *et al.*, 2009; Bello y Gómez, 2001).

Para realizar los procesos de recuperación del suelo, es frecuente el uso de tratamientos físico-químicos que en muchos casos alteran seriamente las propiedades del mismo, tienen una eficacia limitada y presentan costos muy elevados (Ercoli *et al.*, 1999; Reddy *et al.*, 1999). De acuerdo con lo expuesto, la presente investigación se realizó con el objetivo de evaluar el efecto de la remolacha forrajera (*B. vulgaris*), el nabo forrajero (*B. rapa*) y el rábano forrajero (*R. sativus*), para la rehabilitación de un SSA del municipio de Paipa (Boyacá, Colombia), y de esta forma contribuir en la búsqueda de estrategias de uso sostenible y mitigación del efecto ambiental negativo generado en el Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

MATERIALES Y MÉTODOS

Etapa inicial

El SSA objeto de estudio se colectó en el sector Varguitas del municipio de Paipa, Boyacá, Colombia, ubicado a una altura promedio de 2.500 msnm, con coordenadas 5° 4' 51" N y 73° 3' 29" O, debido a los reportes acerca de la existencia de suelos con características de acidez extrema (GISSAT, 2006).

En dicha zona, de acuerdo con la metodología planteada por Bautista *et al.* (2011) se tomó una muestra de 1 kg de suelo para realizar su caracterización según la metodología planteada por el IGAC (2006). También se colectaron 135 kg de suelo a una profundidad no superior a 20 cm, los cuales se trasladaron al Jardín Botánico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia –UPTC– en Tunja, el cual se encuentra ubicado a una altura de 2.680 msnm, para el montaje de las unidades experimentales (UE) donde, adicionalmente, se colectaron 135 kg de suelo no sulfatado, provenientes de las actividades de siembra en el Jardín.

Montaje de unidades experimentales

Se implementó bajo cubierta un diseño experimental completamente al azar con 6 tratamientos (tabla 1) y 3 repeticiones; cada unidad experimental se componía de tres bolsas de polietileno para vivero con 5 kg de suelo, para un total de 54 unidades experimentales. Para el montaje de las unidades experimentales, se agregó suelo

sulfatado ácido en 27 de ellas y suelo no sulfatado (suelo control) en las otras 27; cabe resaltar que previamente el suelo se sometió a un “desmenuzado” manual con el objeto de simular labores agrícolas de presiembra como rastrillada y arado. De acuerdo con los resultados arrojados por el análisis inicial de los dos tipos de suelo, se realizaron los cálculos de las cantidades necesarias de enmienda a emplear; por lo tanto, en el suelo sulfatado ácido se agregaron 20 t/ha de cal dolomita y en el suelo no sulfatado 8,8 t/ha de cal agrícola. Con el fin de conseguir una distribución más uniforme, el

correctivo se incorporó de forma homogénea y se mezcló vigorosamente para lograr mayor contacto con las partículas del suelo. Posteriormente, se realizó el montaje de las unidades experimentales y luego de un periodo de 60 días de reacción de la enmienda, se sembraron 4 semillas por bolsa, según tratamiento. Después de 30 días se llevó a cabo un proceso de raleo, en el cual se dejaron dos plantas por bolsa. El riego se realizó por aspersión durante 30 minutos aproximadamente, con un intervalo de dos días.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos evaluados en los dos tipos de suelo de estudio

Tratamiento	Descripción
[T1]	Suelo no sulfatado + Remolacha forrajera (<i>Beta vulgaris</i> L.)
[T2]	Suelo no sulfatado + Nabo forrajero (<i>Brassica rapa</i> L.)
[T3]	Suelo no sulfatado + Rábano forrajero (<i>Raphanus sativus</i> L.)
[T4]	Suelo sulfatado ácido + Remolacha forrajera (<i>Beta vulgaris</i> L.)
[T5]	Suelo sulfatado ácido + Nabo forrajero (<i>Brassica rapa</i> L.)
[T6]	Suelo sulfatado ácido + Rábano forrajero (<i>Raphanus sativus</i> L.)

Etapa de laboratorio

El pH se midió mediante la técnica del potenciómetro (relación suelo:agua 1:1) y la acidez intercambiable según la metodología de Luang estipuladas por el IGAC (2006). Se realizó una medición 0 (cero) correspondiente al suelo sin corrección agronómica, una inicial luego del periodo de reacción de la enmienda, y una final después de la cosecha de las especies (a los 120 días de la siembra). Al término del periodo vegetativo se determinó la respuesta agronómica de las plantas, medición de altura de la planta y diámetro de raíz, en cada tratamiento.

Procesamiento de datos

Se realizó un análisis de varianza (anova) para determinar diferencias estadísticas entre tratamientos y se utilizó la prueba de comparación de promedios de Tukey con una confiabilidad de 95%, con el programa estadístico SAS versión 9.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El pH, Al³⁺ y la acidez intercambiable presentaron diferencias significativas (P < 0,01) entre tratamientos y con respecto al valor obtenido en la medición inicial (luego del enclado) en los dos tipos de suelo. Con las especies vegetales evaluadas se generó un incremento leve en el pH y una disminución considerable en acidez del suelo (figura 1A, 1B y 1C).

Se observó un ligero aumento del pH en los diferentes tratamientos, excepto en las unidades experimentales de suelo no sulfatado donde se sembró la remolacha. El mayor incremento de este parámetro en el suelo sulfatado ácido se registró con la siembra de la remolacha, mientras que en el suelo no sulfatado se evidenció con el nabo y el rábano (figura 1A). De acuerdo con Ocampo *et al.* (2007), la variación del pH está estrechamente relacionada con el poder tampón del suelo y para que el correctivo produzca el efecto deseado debe ser aplicado 1 a 2 meses antes de la implantación del cultivo -como se realizó en este estudio-, lo cual pudo haber favorecido el establecimiento de las plantas y el incremento del pH.

Los resultados obtenidos concuerdan con los reportes realizados por el GISSAT (2006) y Cabrales (2007), quienes obtuvieron valores similares con la aplicación de cal en los departamentos de Boyacá y Córdoba, respectivamente. Ocampo *et al.* (2007) registraron incrementos del pH luego de la incorporación de 20,8 t/ha de cal dolomita, y Fuentes (2002) indica que la cal dolomita actúa como un excelente corrector de suelos ácidos elevando el pH, lo cual se confirmó con los resultados obtenidos en esta investigación.

No se encontró Al^{+3} en las mediciones de los tratamientos del suelo no sulfatado; sin embargo, en el suelo sulfatado ácido se evidenció una disminución significativa de

este catión con la siembra de las tres especies, siendo la remolacha la que registró una menor concentración final (figura 1B). Por otro lado, la acidez intercambiable no se presentó en la medición final de los tratamientos del suelo no sulfatado, lo cual sugiere que este parámetro probablemente disminuyó con la siembra de las tres especies, ya que inicialmente señaló un valor 0,30 cmol/kg en este tipo de suelo. Asimismo, en las unidades experimentales correspondientes al suelo sulfatado ácido se logró una disminución considerable de esta variable con el cultivo de las tres especies; sin embargo, la reducción más notable se obtuvo con la siembra de remolacha, en comparación con los tratamientos con nabo y rábano, donde también se redujo notoriamente (figura 1C).

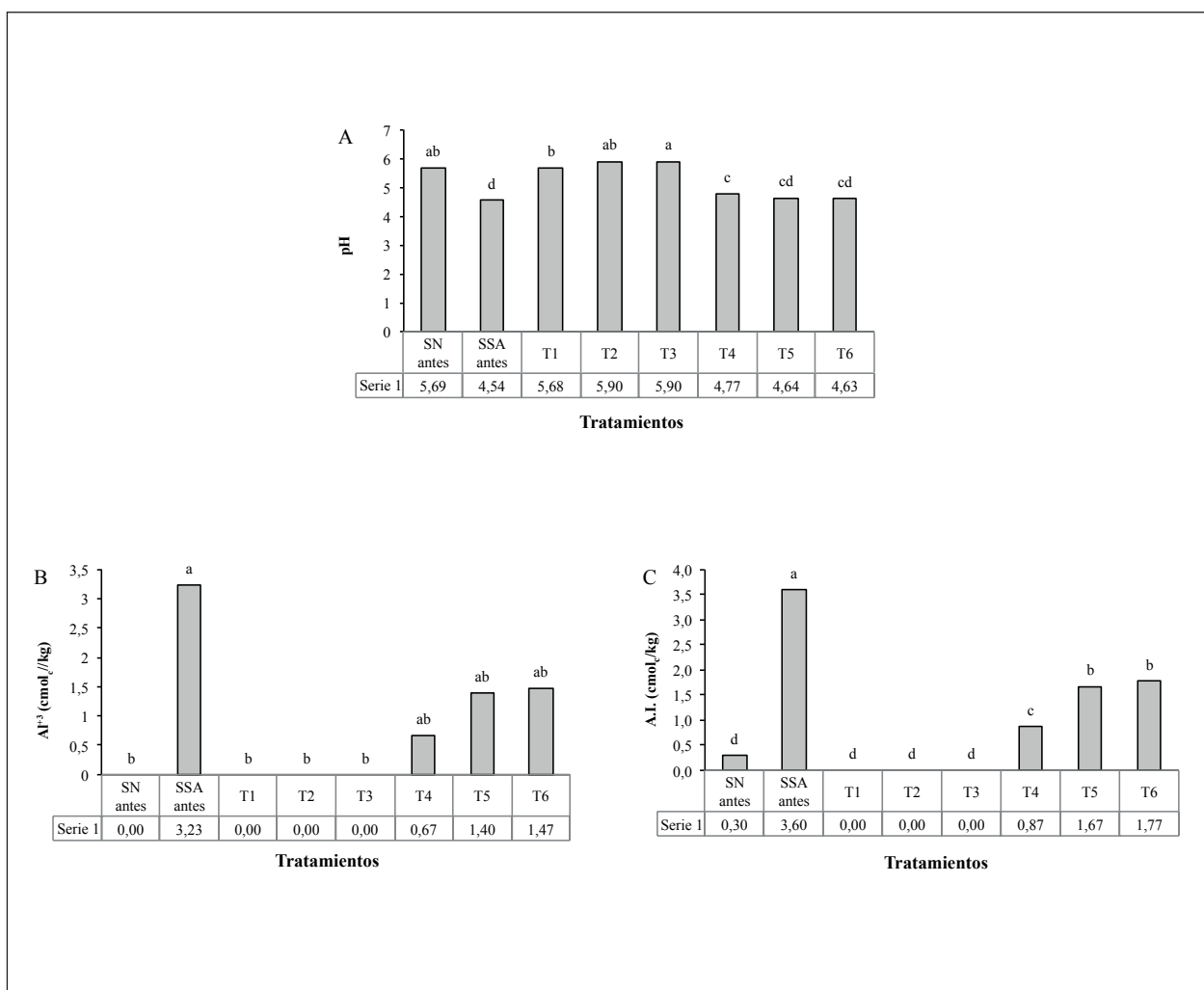


Figura 1. Efecto de especies vegetales sobre un suelo sulfatado ácido y un suelo no sulfatado: A) pH; B) Aluminio intercambiable; C) Acidez intercambiable

A.I.: acidez intercambiable

SSA: suelo sulfatado ácido

SN: suelo no sulfatado

SN antes: medición del SN antes de la siembra; SSA antes: medición del suelo sulfatado ácido antes de la siembra; T1: SN + remolacha forrajera; T2: SN + nabo forrajero; T3: SN + rábano forrajero; T4: SSA + remolacha forrajera; T5: SSA + nabo forrajero; T6: SSA + rábano forrajero.

Promedios seguidos de letras distintas en la misma serie presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey (5%).

De acuerdo con Fuentes *et al.* (2006), el encalado mejora y sostiene condiciones favorables para el control de la acidez del suelo, ya que reduce considerablemente las concentraciones de Al^{+3} e incrementa el pH (Cook *et al.*, 2000; Castro *et al.*, 2006 y Bernier y Alfaro, 2006). Espinosa y Molina (1999) afirman que la neutralización de los iones H^+ por los iones OH^- se produce cuando la cal entra en contacto con el agua del suelo (Zhang *et al.*, 2004). Combatt *et al.* (2007) señalan que la acidez intercambiable se reduce debido a la neutralización del aluminio por precipitación, como consecuencia de la incorporación de cal, lo cual aumenta el pH del suelo. Por lo tanto, la aplicación de 20 t/ha de cal dolomita

en el suelo sulfatado ácido, junto con la utilización de las especies vegetales, facilitó la obtención de un pH superior a 4,6, mayor disminución en la concentración de aluminio y, por ende, menor acidez respecto a los valores obtenidos antes de la siembra.

En cuanto a la respuesta fisiológica de las plantas, las variables altura de la planta y diámetro de raíz presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,01$). Se encontró que el nabo forrajero desarrolló un mejor potencial de crecimiento y resistencia a la acidez del suelo, mientras que el crecimiento de la remolacha forrajera se vio afectado en el suelo sulfatado ácido (figura 2A y 2B).

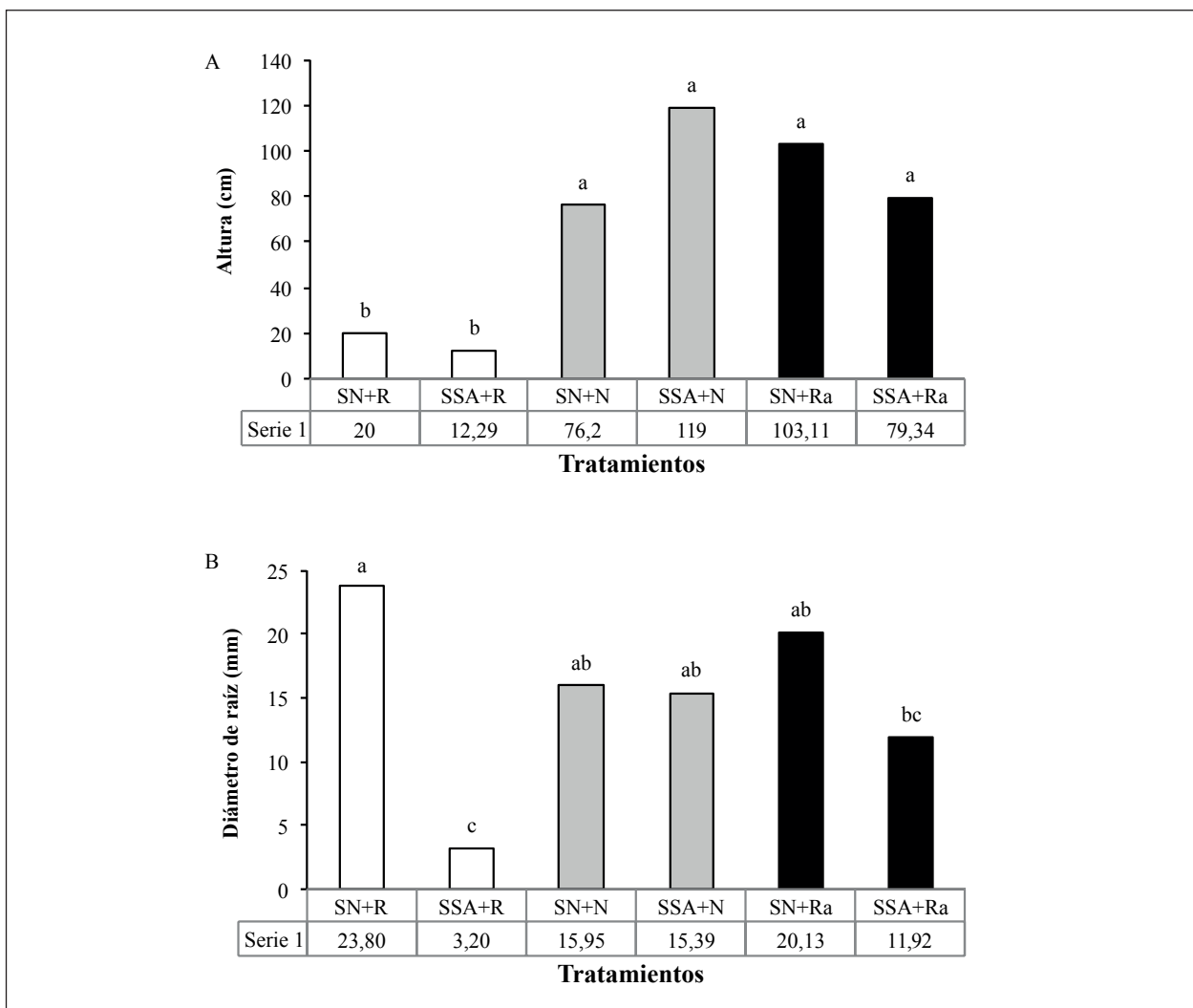


Figura 2. Medición de variables agronómicas de las plantas en un suelo sulfatado ácido y un suelo no sulfatado: A) Altura; B) Diámetro de la raíz

SSA: suelo sulfatado ácido

SN: suelo no sulfatado

SN + R: SN + remolacha forrajera; SSA + R: SSA + remolacha forrajera; SN + N: SN + nabo forrajero; SSA + N: SSA + nabo forrajero; SN + Ra: SN + rábano forrajero; SSA + Ra: SSA + rábano forrajero.

Promedios seguidos de letras distintas en la misma serie presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey (5%).

En cuanto a la altura de las plantas, la remolacha y el rábano no presentaron diferencias estadísticas entre tipos de suelo; sin embargo, en estas especies se observó una altura considerablemente mayor en el suelo no sulfatado, en comparación con el suelo sulfatado ácido; por lo cual se podría inferir que el tipo de suelo afectó el crecimiento de estas especies. En el caso del nabo, se obtuvo una altura significativamente mayor en el suelo sulfatado ácido, respecto al no sulfatado, lo que podría indicar una respuesta positiva de la especie a las condiciones adversas del suelo sulfatado ácido (figura 2A).

De acuerdo con Girón *et al.* (2012), la remolacha en condiciones de crecimiento normales alcanza entre 35 y 45 cm de altura, superior al obtenido en este estudio en los dos tipos de suelo. En suelos sulfatados ácidos, Hernández y Viteri (2006) encontraron una altura promedio de 28 cm a los 120 días de crecimiento, resultado que difiere significativamente con lo reportado en esta investigación, con una altura promedio de 12,2 cm (figura 2A). La notable disminución en el crecimiento de esta especie en el suelo sulfatado ácido pudo estar dada por las condiciones particulares de los mismos y/o deficiencias de algunos minerales básicos para su crecimiento, ya que según Morales (1995), cuando se presentan deficiencias de nutrientes en el suelo, las plantas crecen menos, tienen menor número de hojas y su rendimiento es mucho menor que el normal.

En cuanto a la altura del rábano forrajero, en otros estudios se registraron valores similares; por ejemplo, Nasevilla (2010) indica que en condiciones normales de suelo alcanza entre 80 y 120 cm de altura, INBUY (2011) señala un rango de altura entre 40 y 100 cm, y Vibrans (2009) señala valores entre 5 y 120 cm. En suelos sulfatados ácidos, Hernández y Viteri (2006) reportaron que esta especie presentó una altura promedio de 40 cm a los 120 días de crecimiento, la cual no coincide con lo obtenido en este estudio, debido a que se registró un valor de 79,3 cm; esta diferencia puede explicarse por el hecho de que en el estudio realizado por dichos autores, se presentó un ataque de áfidos en esta especie, lo cual pudo haber disminuido considerablemente su potencial de crecimiento.

Respecto al nabo forrajero, de acuerdo con la FAO (2006), en condiciones normales de crecimiento la altura varía entre 30 y 50 cm; según Undersander *et al.* (1991), entre 30,4 y 91 cm; Francisco (2010), entre 30 y 120 cm; la USDA & NRCS (2013), entre 30,48 y 91,44 cm; y Birbaumer *et al.* (2000) señalan que puede alcanzar

hasta 2 m de altura. En este sentido, y teniendo en cuenta la gran varianza entre reportes bibliográficos, el nabo forrajero se encuentra dentro de los límites normales de altura en los dos tipos de suelo (figura 2A). Según Padilla *et al.* (2005), estas variaciones respecto a la altura del nabo forrajero se presentan debido a que el grado de ramificación y el comportamiento de la planta dependen de la variedad y de las condiciones ambientales. Asimismo, Francisco *et al.* (2010) sugieren que tanto los factores ambientales como los parámetros del suelo y el clima parecen tener influencia en algunos rasgos relacionados con la producción y adaptación de la especie. Sin embargo, es de resaltar que registró mayor altura en el suelo sulfatado ácido, lo cual pudo deberse a que el nabo forrajero se adapta fácilmente y tolera rangos de pH bajos (USDA & NRCS, 2013). Adicionalmente, se observó que los datos obtenidos en el suelo sulfatado ácido no presentaron diferencias respecto a los reportes hechos por Hernández y Viteri (2006), quienes encontraron una altura promedio de 132 cm (aproximadamente) a los 120 días de crecimiento; al respecto, Clark (2007) sugiere que esta especie crece mejor en suelos bien drenados y húmedos, pero también puede crecer en condiciones de sequía, calor moderado y/o suelos con baja fertilidad.

En cuanto a la variable diámetro de raíz, la remolacha presentó un valor considerablemente mayor en el suelo no sulfatado en comparación al sulfatado ácido, comportamiento similar al registrado con el rábano, lo cual indica que el tipo de suelo influyó significativamente en el desarrollo de la raíz en estas especies. En el caso del nabo, se obtuvieron valores similares en los dos tipos de suelo para esta variable (figura 2B). Antrillao (2009) registró un promedio de 11 cm para el diámetro de la raíz del nabo forrajero 120 días después de la siembra, en suelos con condiciones normales; Francisco (2010), por su parte, reportó valores entre 5 y 15 cm y Undersander *et al.* (1991) afirman que generalmente se encuentra entre 7,62 y 10,16 cm, lo cual concuerda con lo obtenido en este estudio. La respuesta positiva que se determinó en esta especie podría deberse a las características de la raíz, ya que de acuerdo con Birbaumer *et al.* (2000), el nabo forrajero posee una raíz profunda que “descompacta” o abre el suelo, lo cual favorece el reciclaje de nutrientes, especialmente N y P; adicionalmente, señalan que es una planta que se desarrolla satisfactoriamente incluso en condiciones de lluvia escasa, y debido a su rápido crecimiento presenta un control notable de malezas.

Los resultados encontrados en este estudio sugieren que la siembra de las tres especies vegetales, junto con el uso complementario de enmiendas calcáreas como correctivo, indujo a una mejoría en las condiciones químicas del suelo sulfatado ácido y, por ende, podría generar un ambiente propicio para aumentar la productividad de estos suelos, ya que la acidez se puede disminuir en respuesta a un cultivo fitorremediador, tanto por la propia absorción de las plantas como por su interacción con los componentes del mismo (Dakora y Phillips, 2002; Hinsinger *et al.*, 2003).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El crecimiento de *B. rapa* y *R. sativus* en el suelo sulfatado ácido, junto con el uso complementario de enmiendas calcáreas como correctivo, favoreció la reducción en los niveles de Al³⁺ y acidez intercambiable, y permitió un aumento leve en el pH; asimismo, estas especies

presentaron un mejor potencial de crecimiento y resistencia en comparación con la remolacha forrajera (*Beta vulgaris*).

La siembra de *Beta vulgaris* propició una mayor reducción de la acidez intercambiable en el suelo; sin embargo, esta especie registró los valores más bajos en las variables agronómicas: altura de la planta y diámetro de la raíz en comparación con las otras dos especies.

Se recomienda la implementación de este estudio en campo para corroborar la respuesta de las especies como cultivos de cobertura o forraje, debido a que su ejecución bajo cubierta no asegura el mismo comportamiento por las diferentes condiciones climáticas u otros factores de alteración que puedan presentarse. La validación de los resultados en campo podrá generar un mayor impacto social, que garantice el reconocimiento y práctica de las metodologías factibles para la recuperación de estos suelos.

REFERENCIAS

- Antrillao I. 2009. Utilización de nabo forrajero (*Brassica rapa*) como suplemento de otoño para la engorda de corderos, en la Zona Intermedia de Aysén (tesis de grado Ingeniero Agrónomo). Valdivia, Chile, Universidad Austral de Chile, Escuela de Agronomía. 54 p.
- Bautista ZF, Delfín GH, Palacio JL. 2011. Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. 2 ed. México D.F. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Instituto de Geografía UNAM. 770 p.
- Bello F, Gómez M. 2001. Recuperación de suelos sulfatados ácidos en área del distrito de riego del Alto Chicamocha Tibasosa (Boyacá) (tesis de grado Ingeniero Agrónomo). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá, Colombia.
- Bernier R, Alfaro M. 2006. Acidez de los suelos y efectos del enclado. Boletín no. 151, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile. 46 p.
- Birbaumer G, Grupos temáticos del proyecto. 2000. Cultivar sin arar. Labranza mínima y siembra directa. Bogotá D.C. Proyecto de Conservación de Suelo y Agua en la Zona Andina – Proyecto Checua. 146 p.
- Cabrales EM. 2007. Dinámica nutrimental y caracterización microbiológica de los suelos sulfatados ácidos del valle del Sinú, Colombia. Línea de Investigación Suelos y Aguas, Grupo de Investigación Manejo de Cultivos Tropicales, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Córdoba. Montería, Colombia. 201 p.
- Campos del Pozo VM. 2010. Fitorremediación de contaminantes persistentes: una aproximación biotecnológica utilizando chopo (*Populus spp.*) como sistema modelo (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid. 228 p.
- Castro H, Gómez M, Munévar O, Hernández D. 2006. Diagnóstico y control de la acidez en suelos sulfatados ácidos en el Distrito de riego del Alto Chicamocha (Boyacá) mediante pruebas de incubación. Agronomía Colombiana 24(1):122-130.
- Castro H, Munévar O. 2011. Mejoramiento químico integral de suelos ácidos mediante el uso combinado de materiales enclantes. XIX Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo, Calabozo, Venezuela, noviembre de 2011.
- Clark A. 2007. Managing cover crops profitably. 3th ed. Beltsville, MD, Handbook Series Book 9, Published by the Sustainable Agriculture Network, 248 p.
- Combatt E, Martínez Z, Cabrales E, Martínez G, Castillo C, Palencia M. 2004. Caracterización fisicoquímica y mineralógica de los suelos sulfatados ácidos en el transecto San Carlos - Cotorra-Carrillo. Departamento de Córdoba. Informe del Grupo de Investigación en Cultivos Tropicales de Clima Cálido. Montería, Colombia. 3 p.
- Combatt E, Jarma A, Martínez G, Cabrales E, Cardona C, Atencio L, Cadavid C, Uparela E, Mercado J. 2007. Caracterización de suelos sulfatados ácidos y la respuesta de tres especies vegetales en el bajo Sinú de Córdoba. Informe del Grupo de Investigación en Cultivos Tropicales de Clima Cálido. Universidad de Córdoba, Oficina administrativa de Investigación y Extensión. Montería, Colombia. 278 p.
- Combatt E, Mercado T, Martínez G. 2006. Encalamiento y lavado en un suelo sulfatado ácido de Córdoba, Colombia: II. Efecto sobre micronutrientes en suelos lixiviados. Temas Agrarios 11(2):26-35.
- Combatt E, Palencia G, Marín N. 2003. Clasificación de suelos sulfatados ácidos según azufre extraíble en los municipios del medio y bajo Sinú en Córdoba. Temas Agrarios 8(2):22-29.

- Cook F, Hicks W, Gardner A, Carlin G, Froggatt W. 2000. Export of acidity in drainage water from acid sulfate soils. *Marine Pollution Bulletin* 41(7):319-326.
- Dakora FD, Phillips DA. 2002. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil* 245(1):35-47.
- De la Varga A. 2009. El régimen jurídico de los suelos contaminados desde la perspectiva europea y su regulación en Alemania (tesis doctoral). Universidad del País Vasco, 544 p.
- Dent D, Dawson B. 2000. The acid test. An expert system for acid sulphate soils. En: <http://www.isric.org/>. Consultado: agosto 2012.
- Ercoli E, Gálvez J, Di Paola M, Cantero J, Videla S, Medaura C. 1999. Biorremediación de suelos altamente contaminados. Ingepet. Expl-8-EE-03. 11 p.
- Espinosa J, Molina E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. International Plan Nutrition Institute (IPNI), Costa Rica, 46 p.
- Francisco M, Velasco P, Lema M, Carrea M. 2010. Environmental influence on agronomic and nutritional value of *Brassica rapa*. En: Francisco M. Compuestos bioactivos y producción de grelos y nabizas: variación fenotípica y ambiental (tesis doctoral). Universidad de Vigo, Pontevedra, España, p. 55-77.
- Francisco M. 2010. Compuestos bioactivos y producción de grelos y nabizas: variación fenotípica y ambiental (tesis doctoral). Universidad de Vigo, Pontevedra, España. 186 p.
- Fuentes JL. 2002. Manual práctico sobre utilización del suelo y fertilizantes. Madrid, Mundi-Prensa Libros. 120 p.
- Fuentes J, Bezdicek D, Flury M, Albrech S, Smith J. 2006. Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. *Soil and Tillage Research* 88(1):123-131.
- Girón C, Martínez C, Monterroza M. 2012. Influencia de la aplicación de bocashi y lombriabono en el rendimiento de calabacín (*Cucurbita pepo* L.), espinaca (*Spinacia oleracea* L.), lechuga (*Lactuca sativa* L.) y remolacha (*Beta vulgaris* L.), bajo el método de cultivo biointensivo, San Ignacio, Chalatenango (tesis de grado Ingeniero agrónomo). Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas. El Salvador. 109 p.
- Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales -GISSAT-. 2006. Estudio semidetallado de suelos sulfatados ácidos (Documento 1). Proyecto Colciencias - UPTC "Caracterización de la problemática de suelos sulfatados ácidos improductivos y evaluación del manejo para su habilitación agrícola. Distrito Riego del Alto de Chicamocha (Boyacá)". Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. 63 p.
- Hernández D, Castro H. 2007. Rehabilitación agrícola de suelos sulfatados ácidos en el altiplano Cundiboyacense. Memorias III Encuentro Nacional de Agricultura y Conservación, junio de 2007, p. 20.
- Hernández DM, Viteri SE. 2006. Selección de abonos verdes para el manejo y rehabilitación de los suelos sulfatados ácidos de Boyacá (Colombia). *Agronomía Colombiana* 24(1):131-137.
- Hinsinger P, Plassard C, Tang C, Jaillard B. 2003. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. *Plant and Soil* 248(1-2):43-59.
- INBUY (Base de datos de Invasiones Biológicas para Uruguay). 2011. *Raphanus sativus* L. En: http://inbuy.fcien.edu.uy/fichas_de_especies/DATAonline/DBASEimpresiones/Raphanu_%20sativus_i.pdf. Consultado: febrero 2012.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-. 2006. Métodos analíticos de laboratorio de suelos. 6 ed. Bogotá, D.C., Imprenta Nacional, 648 p.
- Montaño J, Forero F. 2013. Efecto de subproductos orgánicos del proceso panelero sobre propiedades físicas de un suelo sulfatado ácido. *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu.* 14(2):207-214.
- Morales JP. 1995. Cultivo de remolacha. Fundación de Desarrollo Agropecuario. Serie Cultivos. Boletín Técnico 22, 31 p.
- Nasevilla JF. 2010. Estudio de las características fisicoquímicas y nutricionales de dos ecotipos de rábano (*Raphanus sativus* L.) (tesis de grado Ingeniero en Industrialización de Alimentos). Universidad Tecnológica Equinoccial, Facultad Ciencias de la Ingeniería, Quito. 158 p.
- Ocampo J, Chavarriaga W, Ceballos N. 2007. Valoración de tres fuentes de calcio en suelos ácidos de la granja Tesorito y la respuesta en producción para el cultivo de arveja. *Agron.* 15(2):7-15.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura -FAO-. 2006. Fichas Técnicas: Nabo (*Brassica campestris*). En: http://www.fao.org/inpho_archive/content/documents/vlibrary/ae620s/pfrescos/NABO.HTM. Consultado: junio 2012.
- Padilla G, Carrea M, Rodríguez V, Ordás A. 2005. Genetic diversity in a germplasm collection of *Brassica rapa subsp rapa* L. from northwestern Spain. *Euphytica* (145):171-180.
- Pardo S, Suárez H, Pertuz V. 2009. Interacción de los suelos sulfatados ácidos con el agua y sus efectos en la sobrevivencia del bocachico (*Prochilodus magdalenae*) en cultivo. *Rev. Colomb. Cienc. Pec.* 22(4):619-631.
- Reddy KR, Adams JA, Richardson C. 1999. Potential technologies for remediation of brownfields. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management* 3(2):61-68.
- Undersander D, Kaminski A, Oelke E, Smith L, Doll J, Schulte E, Oplinger E. 1991. Turnip. *Alternative Fields Crops Manual*. University of Wisconsin-Extension, Cooperative Extension. University of Minnesota, Center for Alternative Plant & Animal Products and the Minnesota Extension Service. En: <http://www.hort.purdue.edu/newcrop/afcm/turnip.html>. Consultado: agosto 2012.
- United States Department of Agriculture & Natural Resources Conservation Service -USDA & NRCS-. 2013. Claves para la taxonomía de suelos. Carlos A. Ortiz-Solorio, María del Carmen Gutiérrez-Castorena, Édgar V. Gutiérrez-Castorena (trads.). 11 ed. Estados Unidos, Soil Survey Staff. 374 p.
- Urquiza M. 2002. Manejo sostenible de los suelos. Compendio. En: Asociación Cubana de Técnicos Agrícolas y Forestales. En: http://www.actaf.co.cu/index.php?option=com_mtree&task=att_download&link_id=122&cf_id=24. Consultado: septiembre 2011.
- Vibrans H (ed.). 2009. Ficha *Raphanus sativus* L. [en línea]. En: Malezas de México, <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/brassicaceae/raphanussativus/fichas/ficha.htm>. Consultado: enero 2012.
- Zhang H, Schroder J, Krenzer E, Kachurina O, Payton M. 2004. Yield and quality of winter wheat forage as affected by lime. En: *Plant Management Network*, <http://www.plantmanagementnetwork.org/pub/fg/research/2004/lime/>. Consultado: mayo 2013.