

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO EXPLOTADO PARA LA MINERÍA DESPUÉS DE DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO

Soil Quality Assessment of Mined Land After Remediation Management

Aridio Pérez¹, Carlos Céspedes¹, Isidro Almonte¹, David Sotomayor Ramírez², Cesar Edmundo Cruz³ y Pedro Antonio Núñez^{1*}

RESUMEN

Las actividades mineras en la República Dominicana están asociadas a: contaminación por metales pesados de las áreas circundantes, aumento de la erosión del suelo, pérdida de la biodiversidad del ecosistema y efectos negativos en la calidad del suelo (ej., propiedades biológicas, químicas y físicas). El objetivo del presente trabajo fue determinar las propiedades físicas y químicas de los suelos seleccionados en sitios explotados con actividades mineras que fueron re-plantados con *Casuarina equisetifolia* Forst y *Acacia mangium* Willd. Además, se determinaron los cambios de esas propiedades del suelo en relación a la cronosecuencia en el proceso de recuperación. Se realizó en la provincia Monseñor Nouel, República Dominicana. La calidad del suelo en la cronosecuencia de *Casuarina* y *Acacia* fue diferente, en comparación con el suelo recientemente explotado por la minería y la de bosque natural. En la cronosecuencia de *Casuarina* el pH del suelo disminuyó, mientras la conductividad eléctrica, el N total y C total aumentaron. En la cronosecuencia con *Acacia*, el comportamiento fue el mismo con relación a la bancada (terrace), sin embargo en esta cronosecuencia el pH y el N total incrementaron. La conductividad eléctrica y carbono total no mostraron diferencias significativas. En las cronosecuencias de las dos especies, se produjo un aumento en los contenidos de materia orgánica del suelo y la disponibilidad de Ca. Estos resultados sugieren un

mejoramiento en la calidad del suelo, explotado por la minería, al ser replantado con *Casuarina equisetifolia* Forst y *Acacia mangium* Willd en comparación con el bosque natural y la bancada.

Palabras claves: cronosecuencia, propiedades físicas y químicas del suelo, restauración.

SUMMARY

Mining activities in the Dominican Republic are associated with heavy metal contamination of surrounding areas, increased soil erosion, loss of ecosystem biodiversity, and negative impacts to soil quality (i.e., biological, chemical and physical properties). The objective of this work was to assess selected soil physical and chemical characteristics of a mined site that was re-planted with *Casuarina equisetifolia* Forst and *Acacia mangium* Willd in order to determine the changes of these soil properties as related to the chronosequence in the recovery process. The study was conducted in the province Monseñor Nouel, Dominican Republic. Overall, soil quality was different under the *Casuarina* and *Acacia* chronosequences as compared to recently mined soil and that under natural forest. In the *Casuarina* chronosequence soil pH decreased while soil electrical conductivity, total N, and total C increased. In the *Acacia* chronosequence, soil quality was similar to the terraced area, but pH and total N increased; no significant differences were observed for soil electrical conductivity and total carbon. In both species chronosequences, there was an increase in soil organic matter and available Ca. These results suggest there is an improvement in soil quality of the land in the mining area as a result of remediation by replanting with *Casuarina equisetifolia* Forst and *Acacia mangium* Willd compared to natural forest and terrace.

Index words: chronosequence, soil physical and chemical properties, restoration.

¹ Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF). Avenida Imbert no. 5, Las Carolinas. La Vega, República Dominicana.

* Autor responsable (pnunez@idiaf.gov.do)

² Dpto. de Ciencias Agroambientales, Colegio de Ciencias Agrícolas. Universidad de Puerto Rico. 9000 Recinto Mayagües, Puerto Rico.

³ Universidad ISA. Av. Antonio Guzmán Fdez. Km 5.5, Apartado Postal 166. La Herradura, Santiago, República Dominicana.

INTRODUCCIÓN

Los yacimientos de níquel-laterita en la República Dominicana se encuentran en la cima de una cadena de colinas y dorsales montañosas, a lo largo de una franja de peridotitas serpentinizadas de tipo alpino (Draper y Gutiérrez-Alonso, 1997). Esta área ha sido explotada desde 1971 para extracción de ferroníquel (Falconbridge Dominicana, 1971) a cielo abierto, con una producción anual de Ni de aproximadamente 28 000 toneladas métricas. El proceso de extracción de ferroníquel consiste en la remoción completa de la vegetación y el horizonte superficial (0 a 10 cm) del suelo, seguido por otra remoción del suelo subyacente correspondiente a un espesor de 40 cm. La serpentina depositada debajo del suelo es removida para la posterior extracción del mineral. Las capas superficiales de suelo removidas son repuestas sobre las áreas explotadas, previamente acondicionadas en bancadas (terrazas).

Las actividades mineras dejan tierras fuertemente excavadas con riesgo de derrumbes, suelos compactados, con pérdida de estructura, con deficiencias químicas, pH extremos y restos de metales pesados tóxicos (Wheeler y Miller, 1990). La remoción de la cubierta vegetal reduce la biodiversidad y el contenido de materia orgánica (MO) del suelo que incrementan los riesgos de erosión (Izquierdo *et al.*, 2005; Banning *et al.*, 2008). Para minimizar los daños ambientales, la remediación y restauración del suelo deberían ser tomadas en cuenta para producir una estabilización del mismo y la eventual colonización de organismos (Murcia *et al.*, 2007).

La rehabilitación de suelos usados para la minería comprende la implementación de medidas tanto mecánicas como biológicas; entre estas últimas se han ensayado plantaciones de árboles fijadores de nitrógeno (Dagar, 1998). Por ejemplo, una práctica de remediación implantada en los últimos años es sembrar las bancadas con gramíneas de rápido crecimiento, para consolidarlas y estabilizarlas. Luego de un período indeterminado, se establecen especies forestales, tales como: *Casuarina equisetifolia* Forst y *Acacia mangium* Willd, las cuales presentan amplia capacidad de adaptación a las condiciones edafoclimáticas de las aéreas usadas para la explotación minera. De esta manera, se espera iniciar un proceso de recuperación de las propiedades biológicas, físicas y químicas de los suelos intervenidos. Las plantas tienen la habilidad de afectar a los organismos del suelo a través de la modificación del hábitat y la cantidad y calidad de materia orgánica (MO) que retorna

al mismo, en forma de mantillo o los exudados de las raíces (Sotomayor-Ramírez *et al.*, 2004). Se ha demostrado que la regeneración natural con *Casuarina spp.*, es ventajosa para el restablecimiento de la vegetación en las dunas, los sitios mineros y otras tierras abandonadas. Las plántulas arbóreas por lo general compiten adecuadamente con las gramíneas y las hierbas, excepto en condiciones de sequía (Parrotta, 1993).

Sarrailh y Ayrault (2001) reportaron una exitosa recuperación de los suelos explotados con la extracción de níquel (suelos deficientes en fósforo, potasio, nitrógeno y con presencia de metales tóxicos), con la siembra de las especies *Acacia spirorbis* Labill y *Cassuarina collina* Poiss. La reforestación de tierras tropicales abandonadas y degradadas incrementa la tasa de secuestro de carbono de la atmósfera y promueve la biodiversidad (FAO, 2000). *A. mangium*, es uno de los árboles de rápido crecimiento más utilizado en los programas de reforestación en Asia, el Pacífico y en el Trópico húmedo en general. Esta especie se ha naturalizado en Puerto Rico, Brasil y muchas otras áreas, debido a su rápido crecimiento y capacidad para crecer en suelos degradados de baja fertilidad (Francis, 2002). En la República Dominicana, esta planta ha tenido gran aceptación por su rápido crecimiento y ha sido usada en los planes de reforestación y además existen plantaciones comerciales en las que se producen postes para empalizadas, andamios, fabricación de muebles, ranchos para el tabaco y estructuras de invernaderos.

La compañía minera tiene la misión de remediar los suelos explotados y para ello inició un programa de siembra de árboles fijadores de nitrógeno. Sin embargo, desde que el programa se inició no se ha evaluado el cambio de las propiedades del suelo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de las plantaciones de *Casuarina equisetifolia* y *Acacia mangium*, en el tiempo, en la calidad del suelo mediante la medición de las características físicas y químicas de suelos usados para la minería.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Sitio

La zona de explotación de ferroníquel a campo abierto se localiza en la Loma la Peguera de Bonaó, provincia Monseñor Nouel (18° 55' N y 70° 25' O) en la Región dos (2) del Cibao Sur de la República Dominicana

(Figura 1). En esta zona se produce anualmente aproximadamente 28 000 t Ni. La concentración de Ni en estos suelos no ha sido reportada en ningún estudio y la empresa lo maneja en forma confidencial. La topografía del terreno es característica de la zona montañosa del interior de la isla, con vegetación natural predominante de *Pinus occidentalis* L. La zona tiene de altura 380 m en promedio, temperatura media anual de 23.7 °C, pluviometría media anual de 1700 mm y 87% de humedad relativa. La zona de vida es de bosque húmedo subtropical (Reyna y Paulet, 1979). Los suelos son preponderantemente Oxisoles o Ultisoles. El pH promedio del suelo en el bosque natural en la zona es de 6.6.

La zona de estudio fue dividida para seleccionar las áreas de muestreo en: (i) la bancada (estado de intervención inicial, después de finalizada la extracción minera) como la de mayor degradación del suelo; (ii) bosques naturales (zonas aleñañas sin alterar) como área que representa las mejores condiciones de la zona y (iii) condiciones intermedias de plantaciones de *A. mangium*, con edades de 6 y 12 años de plantadas y de *C. equisetifolia*, con edades de 3, 7, 13 y 20 años. En este caso se consideró la edad de las plantaciones al momento de realizar la división de muestreo en la cronosecuencia de especies plantadas (Figura 1).

Las bancadas fueron preparadas con depósito de la capa superficial del suelo removida previo a la extracción minera y sembrada con gramínea (*Cynodon nemfluensis* Vanderyst), similar tratamiento recibió el suelo donde se plantaron las especies en estudio. La densidad de siembra de *C. equisetifolia* y *A. mangium* fue aproximadamente de 1600 (2.5×2.5 m) plantas por hectárea. Para la selección de parcelas de áreas con suelos en recuperación, se consideró la especie, edad y la pendiente del suelo. Para tomar las muestras de suelo se establecieron varios transectos en las diferentes áreas de intervención.

Muestreo de Suelo y Manejo de Muestra

En cada plantación de *C. equisetifolia* y *A. mangium*, se establecieron transectos de 20 m de ancho a lo largo de la plantación. Estos transectos fueron establecidos de la siguiente forma: el primero en forma vertical desde el punto más alto hasta el punto más bajo de la pendiente, y el segundo en forma perpendicular al primero. Las unidades de muestreo se establecieron en estos transectos de la siguiente manera: tres unidades en la misma elevación (media), una unidad en el punto superior y una en el punto inferior de la pendiente, a una distancia de 1.5 m de los troncos de los árboles.

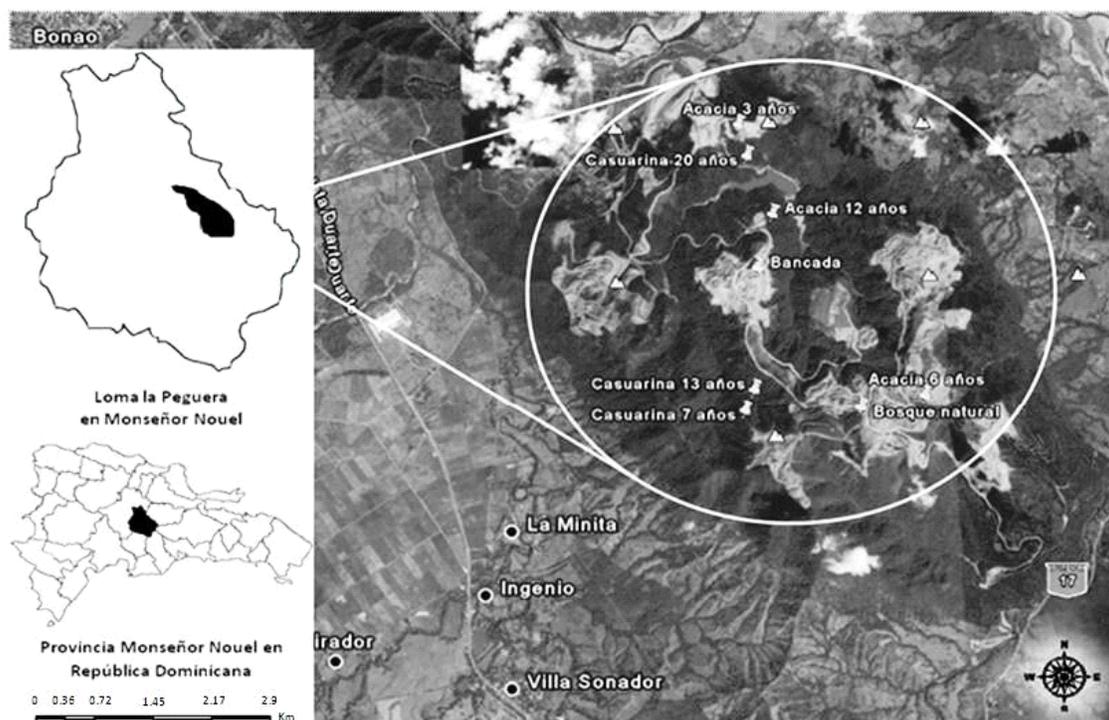


Figura 1. Localización de los sitios de muestreo en las áreas explotadas en Loma la Peguera provincia Monseñor Nouel.

Se tomaron diez muestras compuestas de suelo conformadas por cinco submuestras cada una. Las muestras se colectaron al azar siguiendo trazos en zig zag sobre la meseta. La profundidad de muestreo fue de 0 a 15 cm. El muestreo de suelos se realizó en febrero del 2008. Se utilizó una barrena y palín de acero inoxidable para tomar las muestras. Las pendientes variaron en un intervalo de 4 a 45% (medidas con clinómetro), pero algunas zonas de bosques naturales presentaron pendientes levemente superiores (50%). Las muestras de suelo, fueron secadas al aire y tamizadas con un tamiz con abertura de 2 mm. Todos los transectos y puntos de muestreo fueron geo-referenciados con un sistema de posicionamiento global Garmin GPS 72 tipo (Garmin International, Olathe KS), con el fin de ser evaluadas en un futuro.

Análisis Físicos y Químicos

El análisis químico de las muestras se realizó según las metodologías descritas por Page *et al.* (1982). Se evaluaron los parámetros físicos y químicos: pH en agua (1:2, suelo: agua) por potenciometría; conductividad eléctrica (CE) (1:2, suelo: agua) por conductimetría; materia orgánica (MO) y carbono total (CT) se determinaron por el método de Wakley-Black por oxidación con dicromato de potasio; el nitrógeno total (NT) se cuantificó por el método Kjeldahl con destilación; y el fósforo extraíble se midió por el método Mehlich 3 (Mehlich, 1984). Se determinaron bases intercambiables [potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg)] con acetato de amonio (1N a pH 7), como solución extractante y se calculó el porcentaje de saturación de bases; se determinó la capacidad de intercambio catiónico (suma de bases). Los contenidos en suelos de hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), aluminio (Al) y zinc (Zn) fueron extraídos con Mehlich 3 y cuantificados espectrofotométricamente por Inductively Coupled Plasma (ICP). Boro y molibdeno fueron extraídos con Mehlich 3 y cuantificados con espectrofotométricamente por Inductively Coupled Plasma (ICP). La textura del suelo fue medida usando el método de Bouyoucos (1951).

Análisis Estadístico

Para la identificación de las variables más sensibles a los diferentes tipos de manejo para la recuperación de los suelos minados, se utilizó el análisis de componentes

principales (ACP). Con este análisis se realizó un gráfico bidimensional (BiPlot) a partir de los dos primeros componentes con mayor varianza en el ACP. Las variables más sensibles de los componentes, en función de sus valores de ponderación (E1, E2 y E3) de valor absoluto mayor a 0.25, fueron seleccionadas como indicadores de las propiedades del suelo más explicativas. Dichos indicadores conformaron el conjunto mínimo de indicadores físico y químicos de calidad y fertilidad del suelo (CMICS) (Pierce y Larson, 1993; Maddoni *et al.*, 1999; Schipper y Sparling, 2000; Govaerts *et al.*, 2006). Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias por contrastes, para determinar las diferencias entre las zonas en proceso de recuperación plantadas con *Acacia* y *Casuarina*, bancadas y suelos bajo bosques naturales. Estos contrastes sirvieron para complementar la información del análisis multivariado e interpretar la dinámica de los indicadores de calidad en los suelos estudiados. Para todos los análisis se utilizó el programa Infostat versión 2008 (Infostat, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ochenta y dos por ciento de la variación de los datos se explicó basada en los tres primeros componentes del ACP (Cuadro 1). Las variables más sensibles seleccionadas en el componente principal 1 (CP1) fueron: pH, N-total (NT), C-total (CT), CE y textura; y en el CP2: MO, Mg y Fe (Cuadro 2). Ambos componentes, CP1 y CP2, explicaron 65% de la variación total de los datos (Figura 2). De acuerdo al CP1, los suelos sometidos a diferentes procesos de remediación con *Acacia* o *Casuarina*, que poseen menor pH, mayor contenido de MO, nitrógeno, mayor proporción de limo, y alta conductividad eléctrica fueron separados en magnitud y dirección con aquellos que estaban en el bosque natural y en la bancada.

Al considerar el componente principal 2 (CP2), el bosque natural se ubicó en el cuadrante superior derecho, principalmente debido al peso relativo de las variables antes mencionadas. Lo contrario se observó en los suelos de la bancada, que además se diferenció significativamente de las plantaciones con *Acacia* y con las de *Casuarina* con menor edad de establecidas. Aquellos indicadores en el suelo que representaron contenidos considerables de elementos tóxicos para las plantas como Al y B, alto porcentaje de saturación de bases, Ca y K intercambiables, estuvieron relacionados

Cuadro 1. Análisis de componentes principales.

Componente	Porcentaje de varianza explicado	Variables	Valores de ponderación (autovectores)		
			E1	E2	E3
1	0.45	pH	-0.27	0.06	-0.08
2	0.65	P	0.01	0.05	0.40
3	0.82	Saturación de Ca	0.12	-0.24	-0.30
4	0.91	Saturación de Mg	-0.17	0.21	0.25
5	0.95	Saturación de K	-0.04	-0.30	0.34
6	0.98	CEC	0.24	0.24	9.90E-04
7	1.00	Nitrógeno total	0.28	0.09	0.02
8	1.00	Carbono total	0.29	0.05	7.80E-05
9	1.00	Materia orgánica	0.21	-0.28	-0.08
10	1.00	Carbono inorgánico	0.24	-0.22	0.03
11	1.00	Conductividad eléctrica	0.27	0.12	-2.00E-03
12	1.00	Arena	-0.22	0.24	-0.03
13	1.00	Arcilla	-0.14	-0.15	-0.13
14	1.00	Limo	0.26	-0.14	0.09
15	1.00	K	0.24	-0.04	0.22
16	1.00	Ca	0.22	-0.09	-0.24
17	1.00	Mg	0.16	0.35	0.04
18	1.00	S	-0.03	-0.18	0.03
19	1.00	Al	-0.12	-0.21	0.34
20	1.00	B	-0.05	-0.13	-0.39
21	1.00	Cu	0.25	0.14	0.07
22	1.00	Fe	0.07	0.42	0.03
23	1.00	Mn	0.23	-0.06	-0.03
24	1.00	Mo	-0.10	0.08	-0.32
25	1.00	Na	-0.13	-0.24	0.17
26	1.00	Zn	0.23	-0.07	0.09

CEC = capacidad de intercambio catiónico; E1, E2 y E3 = autovectores (considerados valores > 0.25).

con el componente principal 3 (CP3) con valor propio de 17% (Cuadro 2). Sin embargo, estas variables explican una proporción pequeña de la variabilidad total, ya que los valores de las propiedades del suelo en la bancada son bajos.

Los altos porcentajes de saturación de Ca y K en la plantación 13 y 20 años de edad en comparación con el bosque natural, podría ser explicada en función del incremento de la MO del suelo con la cronosecuencia de *Acacia* y *Casuarina*. Sin embargo, la MO no está representada en el CP1 por tener un valor de ponderación inferior a 0.25. Además las leguminosas arbóreas, con su sistema radical profundo, tienen la capacidad de extraer bases desde el subsuelo y translocarlas a la parte vegetativa aérea para su posterior incorporación al componente mineral y orgánico del suelo.

El Zn, Al, Mn aparecen relacionados a las plantaciones de *Acacia* y *Casuarina* en niveles superiores a los registrados en la bancada. Esas variables son las que se relacionan con el CP2, su valor de correlación es bajo y no representan una cantidad importante en el suelo con relación a la nutrición de las especies. En el caso del Al y Mn en las cronosecuencia, se observa tolerancia de las especies a niveles altos de estos elementos, cuyos valores promedios son superiores a los de referencia.

La influencia de cronosecuencia sobre la calidad de los suelos usados para minería cuando se plantaron con *Casuarina* en mayor grado y *Acacia* en menor grado, es evidente. Los suelos con *Casuarina* presentan propiedades, como pH, CE, NT y CT que se ubican entre aquellos de la bancada y el bosque natural de

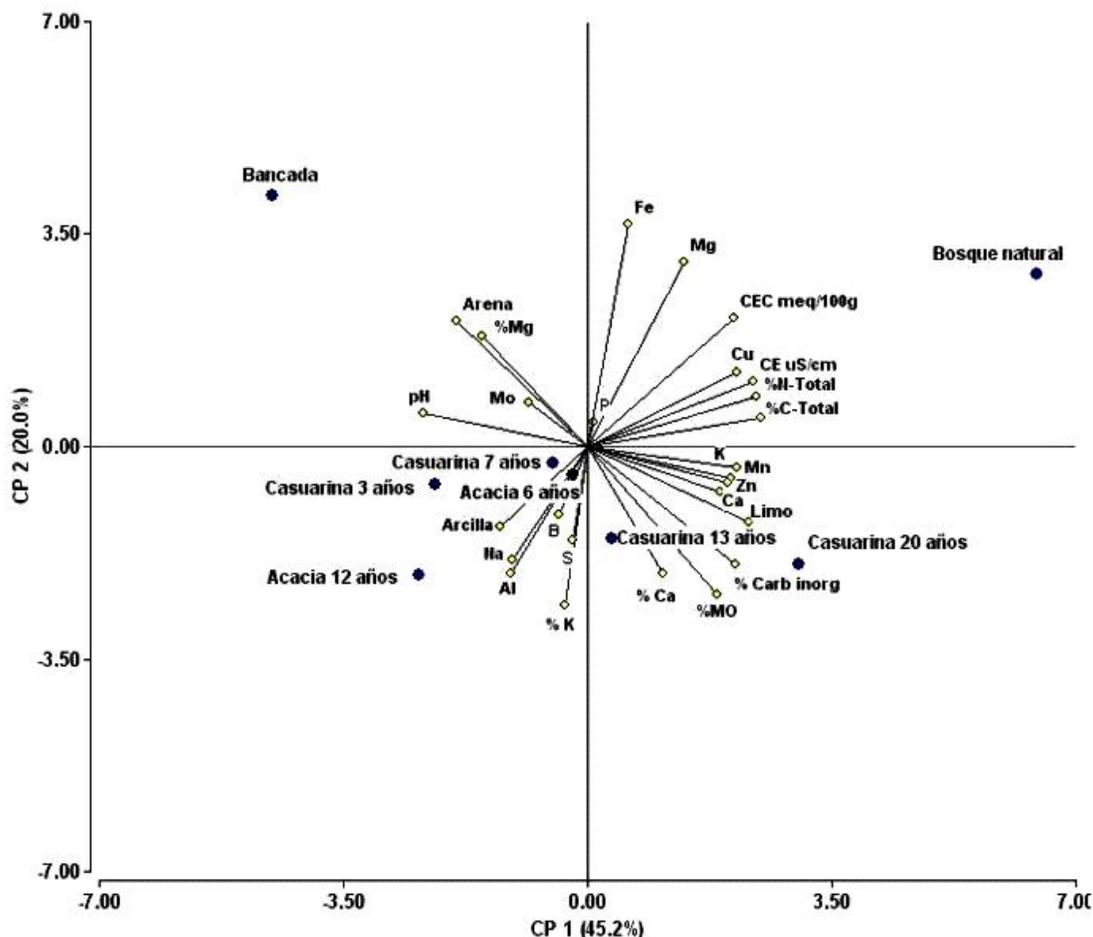


Figura 2. Distribución Biplot, de los CP1 y CP2, de las variables físico-químicas y sitios muestreados.

referencia (Figura 3). Específicamente, el pH del suelo tiende a disminuir con *Casuarina* de mayor edad (Figura 3a), aproximándose a los valores medidos en los suelos bajo bosque natural usado como referencia. Un pH muy ácido libera Al y Mn (Fisher y Juo, 1995) que afectan a los ecosistemas.

Los resultados confirman la aplicabilidad de la herramienta del ACP para detectar cambios en las propiedades del suelo bajo diferentes manejos y procesos de recuperación en suelos explotados con actividades mineras. Por ejemplo, Indeángelo *et al.* (2007) utilizaron la técnica de ACP para seleccionar al NT y C orgánico (entre otros indicadores de calidad de suelo), para diferenciar suelos con manejos contrastantes. Tendencias similares a las encontradas en nuestro trabajo, fueron reportados por Banning *et al.* (2008) en una cronosecuencia de reforestación al observar contenidos comparables a los de un suelo no explotado por la minería.

Cuadro 2. Conjunto mínimo de indicadores de calidad del suelo (CMICS) por componente principal.

Componentes principales	Indicadores seleccionados
Componentes principales 1	pH Nitrógeno total Carbono total Conductividad eléctrica Textura
Componentes principales 2	Materia orgánica Magnesio Hierro
Componentes principales 3	Fósforo Saturación con calcio Saturación con potasio Aluminio Boro Molibdeno

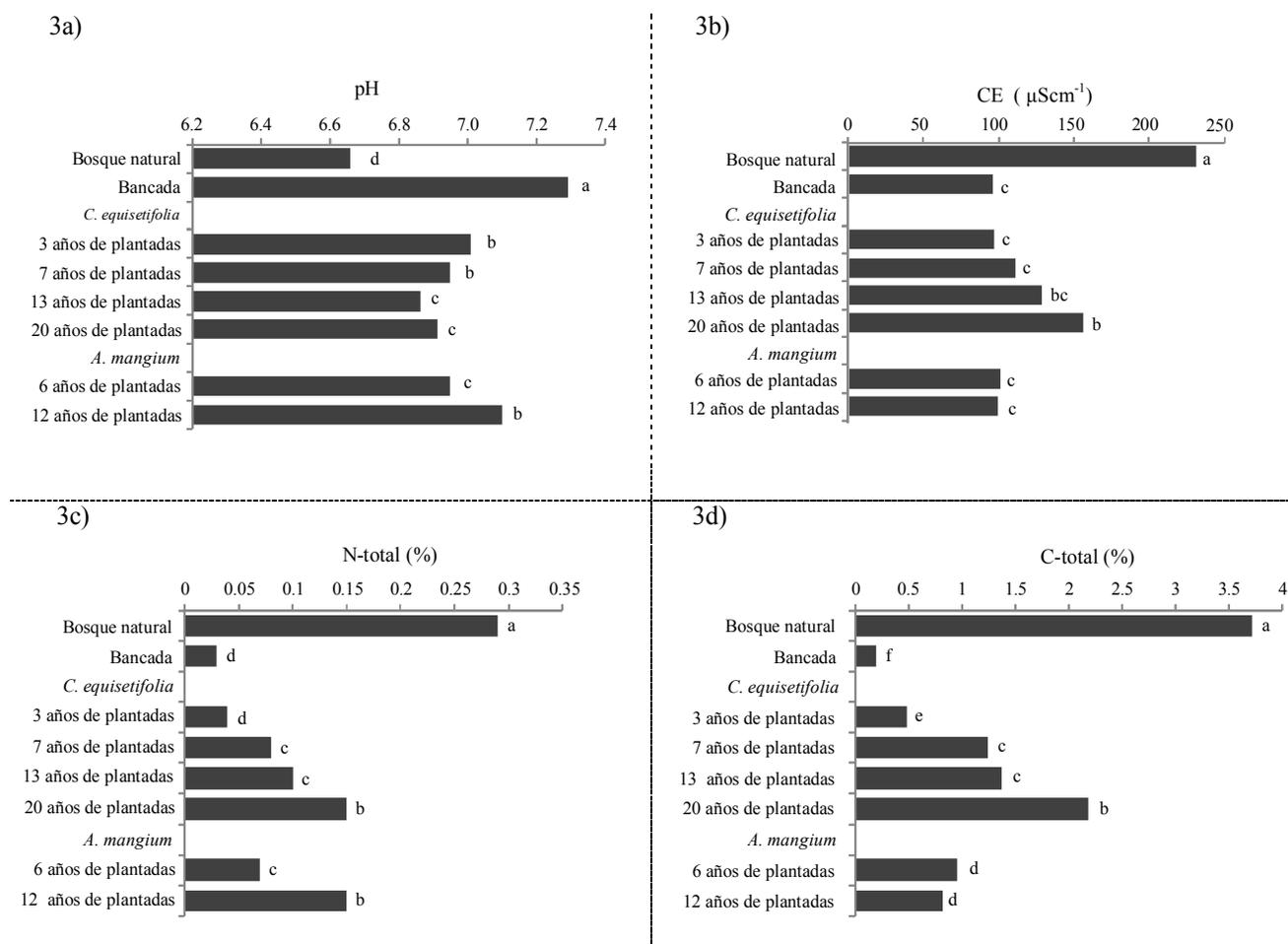


Figura 3. pH (3a), conductividad eléctrica (CE, 3b), nitrógeno total (N-Total, 3c) y carbono total (C-Total, 3d) en el suelo de las diferentes intervenciones de recuperación. Valores en columnas con diferentes letras difieren significativamente ($P < 0.05$).

Las variables (CE, NT y CT) aumentaron con la edad de la plantación de *Casuarina* (Figura 3b, 3c y 3d). Se observan diferencias dentro de una misma especie según las edades de plantadas y el contenido del CMICS entre las dos especies. Izquierdo *et al.* (2005) destacan la importancia de *C. equisetifolia* en favorecer adecuadamente cambios en el contenido de C y N del suelo en periodos tan cortos como 6 años. Šourková *et al.* (2005), señalan que la formación del suelo y la acumulación de carbono orgánico dependen del desarrollo de la cobertura vegetal y la mineralización de los restos vegetales.

Los suelos con bosque natural y los plantados en la cronosecuencia de *Casuarina* de 7, 13 y 20 años de edad, se encuentran asociados con mayor CE del suelo. El análisis de contraste revela que el contenido de K intercambiables era mayor en los suelos plantados con *Acacia* y *Casuarina*, que el suelo de las bancadas, caso contrario al Ca y Mg, (Figura 4). Este comportamiento

podría ser atribuido al aporte de biomasa de ambas especies y a su descomposición. Solamente el suelo bajo *Casuarina* con 13 y con 20 años de establecida tuvo mayor contenido de Ca, porcentaje de saturación de Ca y CIC que el suelo de la bancada. Se puede inferir entonces, que el incremento en CE del suelo con las leguminosas arbóreas podría ser atribuido al incremento de K en el suelo en etapas tempranas de crecimiento y al Ca y K en etapas más avanzadas de la cronosecuencia, ya que la CE está relacionada con las formas solubles de las sales del suelo. Los porcentajes de saturación con Ca, K y Mg (intercambiables) fueron diferentes entre los tratamientos de fitorremediación del suelo minado (Figura 4b, 4c y 4d). Se observaron diferencias significativas entre bosques naturales, bancada y las plantaciones de *Acacia* y *Casuarina*. Entre las plantaciones de *Acacia* con 6 y 12 años de plantadas no hubo diferencias. En plantaciones de *Casuarina*, de 13 y 20 años establecidas, se mostraron

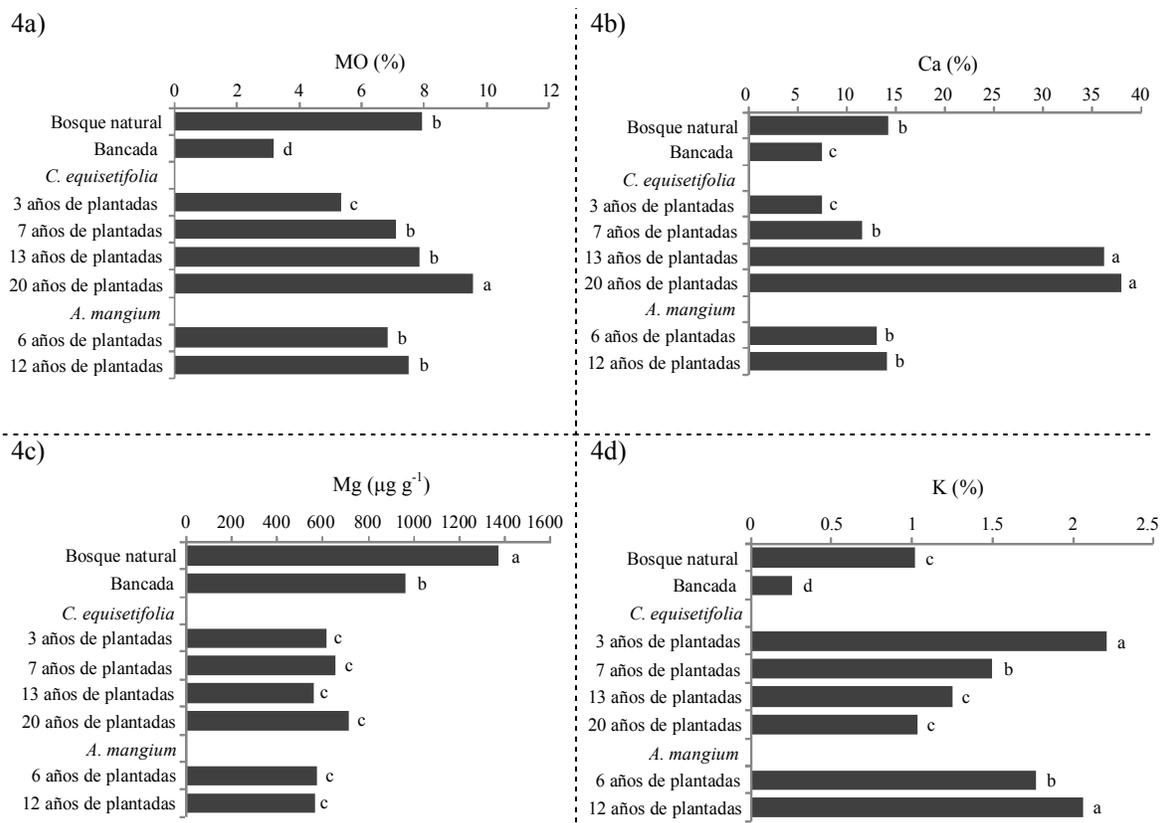


Figura 4. Contenido de materia orgánica (MO, 4a), calcio (Ca, 4b), magnesio (Mg, 4c) y potasio (K, 4d) en los suelos de las diferentes intervenciones de recuperación. Valores en columnas con diferentes letras difieren significativamente ($P < 0.05$).

contenidos similares de estos elementos y, en general, superiores a los de aquellos con menor edad de plantadas.

Los suelos bajo bosque natural, y plantados con *Casuarina* de 7, 13 y 20 años de edad, se encuentran asociados con altos contenidos de MO del suelo. Esto se observa en los cuadrantes derechos de la Figura 2, diferenciado por el CP1. Los valores de todas las cronosecuencias fueron similares a los de bosque natural y mayor que los de la bancada. La plantación de 20 años de *Casuarina* acumuló la mayor cantidad de MO del suelo, y fue superior a aquel determinado en bosque natural (Figura 4a). Esto indica cierta evolución del suelo, con esta plantación previamente explotado con actividades mineras, hacia las características propias del bosque natural de la zona, en relación a las propiedades del suelo y no de la vegetación, a medida que las plantaciones alcanzan mayor edad. La acumulación de la MO del suelo tiene una función importante en este proceso. Según Wick *et al.* (1998), Liebig y Doran (1999), la MO está ligada al mejoramiento de las propiedades químicas del suelo.

Los mayores contenidos de P se registraron en suelos plantados con *Casuarina* a la edad de 3 años y bosque natural (media 8.23 y 3.95 mg kg⁻¹ respectivamente) (Figura 5a). La zona rizosférica de la *Casuarina* representa un ambiente especial para la simbiosis de bacterias que en muchos casos están asociadas a la liberación de nutrientes y en el caso del P, a su solubilización. El P fue el parámetro que mostró la mayor variabilidad y esto podría estar asociado a la ubicación de las parcelas en diferentes relieves del paisaje, ya que ninguna de las parcelas recibió fertilización y estuvieron sujetas a la libre dinámica de estos elementos. Tripathi *et al.* (2009) reportan variación en las propiedades del suelo, influenciadas por depresiones y cambios en la pendiente del paisaje y una vegetación dominada por *Tectona grandis*.

Para el contenido de Fe los resultados indican que los suelos plantados con las dos especies, no mostraron los niveles encontrados en bosque natural y fueron inferiores a los de la bancada (Figura 5b).

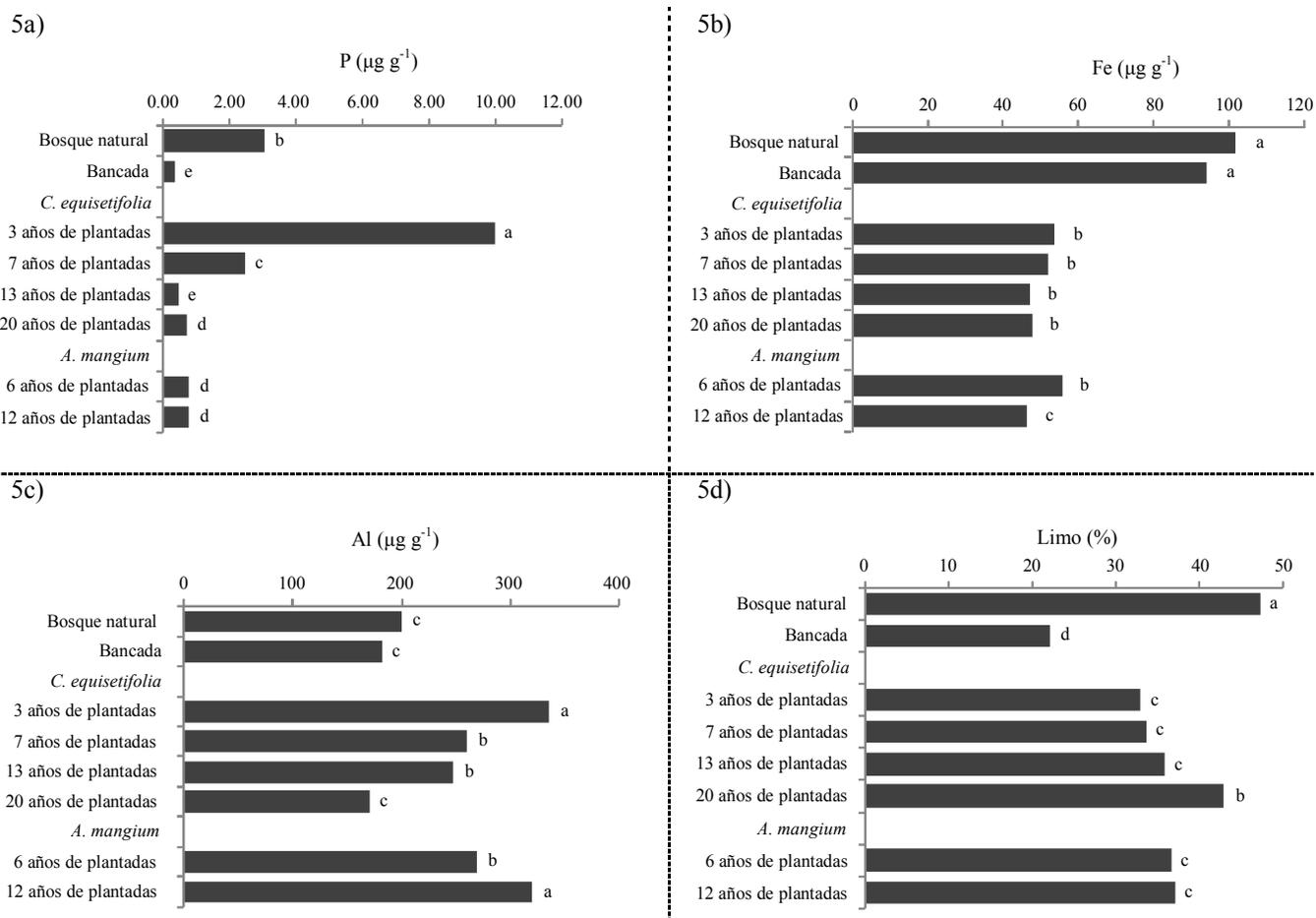


Figura 5. Contenido de fósforo (P, 5a), hierro (Fe, 5b), aluminio (Al, 5c) y Limo (5d) en el suelo de las diferentes intervenciones de recuperación. Valores en columnas con diferentes letras difieren significativamente ($P < 0.05$).

El Al intercambiable en el suelo disminuyó con el incremento de la edad de la plantación en la cronosecuencia de *Casuarina* con una tendencia a reducir el pH excepto a los 20 años de establecida. Esto contrasta con lo observado en la cronosecuencia de *Acacia* (Figura 5c). El porcentaje de limo en el suelo con *Casuarina*, se aproximó a los niveles encontrados en bosques naturales (Figura 5d). El contenido de B en el suelo, no mostró tendencias ni entre especies, ni entre las edades de las mismas, a pesar de las diferencias de contenidos. Los bajos contenidos de B en el bosque natural no están asociados al pH, ya que en estos suelos el pH es más ácido en comparación con los otros sitios. Los niveles de boro no fueron un obstáculo para el establecimiento y desarrollo de la vegetación (Figura 6).

Nuestros resultados coinciden con lo reportado por Izquierdo *et al.* (2005), quienes compararon

el comportamiento de varios indicadores de calidad de suelos con reforestaciones de *C. equisetifolia* y *Anacardium occidentale*, después de 6 años. Estos autores señalan que las propiedades del suelo se acercaron a los de un suelo bajo vegetación nativa. Parrotta (1999), reporta que *C. equisetifolia*, facilita el desarrollo de la vegetación por el incremento en el contenido de nutrientes a través de la acumulación de hojarasca sobre el suelo y la fijación de nitrógeno. La importancia de las leguminosas arbóreas en el mantenimiento de la MO del suelo ha sido atribuida por Sotomayor-Ramírez *et al.* (2009) a la mayor acumulación y preservación de C en un Vertisol, luego de 26 años bajo *Leucaena leucocephala* (Lam.) en comparación con pasturas, *Eucalyptus robusta* Poir y suelos bajo producción agrícola con labranza convencional.

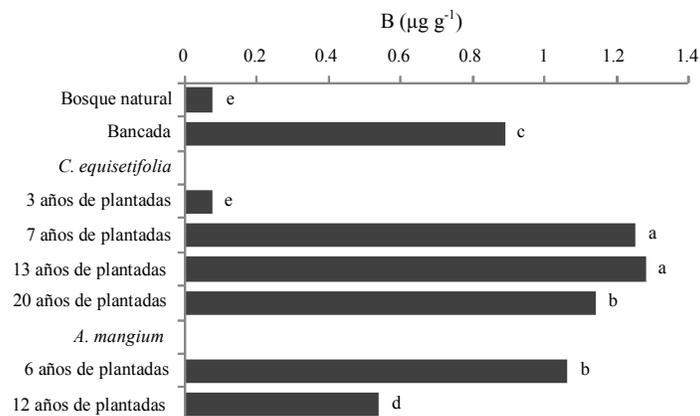


Figura 6. Contenido de boro (B) en los suelos con diferentes intervenciones de recuperación. Valores en columnas con diferentes letras difieren significativamente ($P < 0.05$).

CONCLUSIONES

- Las plantaciones de *Acacia* y *Casuarina* prosperan exitosamente en suelos que fueron explotados con actividades mineras y acondicionados previamente con nivelación, restablecimiento de la capa vegetal y siembra de pasto. Las leguminosas arbóreas aparentemente desempeñan una función importante en la aportación de materia orgánica (MO) al suelo mediante el depósito de hojarasca, reciclaje de K y producción de biomasa radical. Estas especies también mantienen un reciclaje adecuado de MO, la cual tiene fuerte influencia sobre otras propiedades químicas y físicas, en el proceso de recuperación de suelos explotados previamente con minería. Existe una clara tendencia al incremento de la MO y de otras variables relacionadas como N total, C total, porcentaje de saturación de Ca, con ligeras variaciones, desde que inicia el proceso de recuperación del suelo en las bancadas, y continúa a medida que las plantaciones de *Acacia* y *Casuarina* se desarrollan.

- La MO del suelo aumentó con el avance de la cronosecuencia de *Acacia* y *Casuarina*. Conforme avanzó el tiempo de establecidas las especies utilizadas para la remediación, el pH del suelo llegó a valores cercanos al neutro o ligeramente ácido (pH 6.7) en comparación más próximos a los valores del bosque que a los de las bancadas. Los indicadores seleccionados reflejan el efecto del uso de estas especies de plantas en la recuperación de suelos explotados por minería, al registrarse un dinamismo de los mismos hacia niveles similares a los registrados en los bosques naturales. Este estudio tiene la limitación de no considerar la variabilidad

temporal que podría existir en otros indicadores importantes de calidad del suelo, tales como actividad enzimática, biomasa microbiana y respiración del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero y el interés de Falcondo por financiar la investigación, en especial al Ing. Rafael Acosta, Gerente de Recursos Naturales de dicha empresa. A la Universidad ISA (en especial al Dr. Domingo Carrasco) por el apoyo logístico a la investigación. Al Dr. Dick Warren de la Universidad de Ohio (OSU), por su asesoría y análisis de laboratorio. A la Ing. Margarita Betánces por su apoyo en la recolección de las muestras de suelo.

LITERATURA CITADA

- Banning, N. C., C. D. Grant, D. L. Jones, and D. V. Murphy. 2008. Recovery of soil organic matter, organic matter turnover and nitrogen cycling in a post-mining forest rehabilitation chronosequence. *Soil Biol. Biochem.* 40: 2021-2031.
- Bouyoucos, G. L. 1951. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *Agron. J.* 43: 434-438.
- Dagar, J. C. 1998. Nitrogen fixing fodder trees for degraded and problematic lands. pp. 73-81. *In*: J. N. Daniel and J. M. Roshetko (eds.). Nitrogen fixing trees for fodder production. Winrock International. Morrilton, AR, USA.
- Draper, G. y G. Gutiérrez-Alonso. 1997. La estructura del Cinturón de Maimón en la isla Hispaniola y sus implicaciones geodinámicas. *Rev. Soc. Geol.* 10: 281-299.
- Falconbridge Dominicana. 1971. Informe de la empresa. Información disponible en: http://archive.xstrata.com/falconbridge/www.falconbridge.com/spanish/our_business/nickel/operations/falcondo.htm# (Consulta: junio 20, 2009).

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2000. Informes sobre recursos mundiales de suelos. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. Roma, Italia.
- Fisher, R. F. and A. S. R. Joo. 1995. Mechanism of tree growth in acid soils. pp. 1-18. *In*: D. O. Evans and L. T. Szott (eds.). Nitrogen fixing trees for acid soils. Winrock International. Morrilton, AK, USA.
- Francis, J. K. 2002. *Acacia mangium* Willd. pp. 256-257. *In*: J. A. Vozzo (ed.). Tropical trees seed manual, USDA Forest Service, Agriculture Handbook. Washington, DC, USA.
- Govaerts, B., K.D. Sayre, and J. Deckers. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil Tillage Res.* 87: 163-174.
- Indeángelo, N., M. G. Wilson y H. A. A. Tasi. 2007. Indicadores de calidad para dos suelos con características vérticas de Entre Ríos, (Argentina). *Cad. Lab. Xeol. Laxe.* 32: 111-125.
- InfoStat. 2008. Manual del usuario. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Brujas Argentina. Córdoba, Argentina.
- Izquierdo, I., F. Caravaca, M. M. Alguacil, G. Hernández, and A. Roldán. 2005. Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions. *Appl. Soil Ecol.* 30: 3-10.
- Liebig, M. A. and J. W. Doran. 1999. Impact of organic production practices on soil quality indicators. *J. Environ. Qual.* 28: 1601-1609.
- Maddoni, G. A., S. Urricariet, C. M. Ghersa, and R. S. Lavado. 1999. Assessing soil quality in the Rolling Pampa, using soil properties and maize characteristics. *Agron. J.* 91: 280-287.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.* 15: 1409-1416.
- Murcia, F. J., M. J. Gómez, A. Palop, and G. García. 2007. Assessment of mining soil improvement after construction and demolition wastes amendment additions evaluated by microbiological analysis. *Global Nest J.* 9: 224-228.
- Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney. 1982. Method of soil analysis, Part 2, Chemical and microbiological properties. ASA, SSSA. Madison, WI, USA.
- Parrotta, J. A. 1993. *Casuarina equisetifolia* L. ex J. R. & G. Forst. *Casuarina*, *Australian pine*. Casuarinaceae. Casuarina family. USDA Forest Service, International Institute of Tropical Forestry (SO-ITF-SM; 56). New Orleans, LA, USA.
- Parrotta, J. A. 1999. Productivity, nutrient cycling, and succession in single and mixed-species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta*, and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico. *For. Ecol. Manage.* 124: 45-77.
- Pierce, F. J. and W. E. Larson. 1993. Developing threshold values, indicators, and criteria to evaluate sustainable land management. pp. 7-14. *In*: J. M. Kimble (ed.). Proceedings of the eighth International Soil Management Workshop, utilization of soil survey information for sustainable land use. USDA, Soil Conservation Service, National Soil Survey Center. Lincoln, NE, USA.
- Reyna, E. y M. Paulet. 1979. Requerimientos de agua para la agricultura según el clima de la República Dominicana. Documento técnico 2. SEA. Sto. Domingo, Rep. Dominicana.
- Sarrailh, J. M. and N. Ayrault. 2001. Rehabilitation of nickel mining sites in New Caledonia. *Unasyuva* 52. Disponible en <http://www.fao.org/DOCREP/004/Y2795e/Y2795e00.HTM>. (Consulta: julio 27, 2009).
- Schipper, L. A. and G. P. Sparling. 2000. Performance of soil condition indicators across taxonomic groups and land uses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 300-311.
- Sotomayor-Ramírez, D., A. Lugo-Ospina, and R. Ramos-Santana. 2004. Vegetation influence on soil quality in a highly degraded tropical soil. *J. Agric. Univ. P. R.* 88: 11-26.
- Sotomayor-Ramírez, D., Y. Espinoza, and V. Acosta-Martinez. 2009. Land use effects on microbial biomass C, β-glucosidase and β-glucosaminidase activities, and availability, storage and age of organic C in soil. *J. Biol. Fert. Soils* 45: 487-497.
- Šourková, M, J. Frouz, and H. Šantrůčková. 2005. Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic). *Geoderma* 124: 203-214.
- Tripathi, N., R. S. Singh, and J. S. Singh. 2009. Impact of post-mining subsidence on nitrogen transformation in southern tropical dry deciduous forest, India. *Environ. Res.* 109: 258-266.
- Wheeler, C. T. and I. M. Miller. 1990. Current and potential uses of actinorhizal plants in Europe. pp. 365-389. *In*: C. R. Schwintzer and J. D. Tjepkema (eds.). The biology of frankia and actinorhizal plants. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Wick, B., R. F. Kühne, and P. L. G. Vlek. 1998. Soil microbiological parameters as indicators of soil quality under improved fallow management -systems in south-western Nigeria. *Plant Soil* 202: 97-107.