



EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS, COMO ENMIENDA ORGÁNICA, EN LA RECUPERACIÓN DE UN SUELO DISTURBADO POR ACTIVIDAD EXTRACTIVA EN LA CANTERA DE SORATAMA, LOCALIDAD DE USAQUÉN, BOGOTÁ

S. Guacaneme, J. I. Barrera-Cataño

*Escuela de Restauración Ecológica, Unidad de Ecología y Sistemática (UNESIS),
Departamento de Biología, Facultad de Ciencias,
Pontificia Universidad Javeriana Carrera 7ª No. 40-62 Bogotá, Colombia
susmaguaca@yahoo.com, barreraj@javeriana.edu.co*

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar durante nueve meses, el efecto del biosólido en la recuperación de las propiedades físicas y químicas de un suelo disturbado por actividad extractiva, y a su vez comparar el grado de recuperación de los diferentes tratamientos con los suelos de referencia. Para ello, se efectuó un diseño experimental de una vía con tres niveles y tres repeticiones más el control, para un total de 12 parcelas (c/u 18 m²) dispuestas completamente al azar en el terreno.

Se implementaron tratamientos volumen/volumen de estéril - biosólido de la siguiente manera: un tratamiento control sin contenido de biosólido (1:0) y tres tratamientos con contenido de biosólido en las proporciones 8:1 (T1) 4:1 (T2) y 2:1 (T3). Los resultados mostraron que la adición del biosólido como enmienda orgánica, incrementó de manera proporcional los contenidos de carbono orgánico, pH, nitrógeno, fósforo, capacidad de intercambio catiónico, bases totales, humedad y porosidad del suelo, de acuerdo a las dosis aplicadas. Se presentó inicialmente un mayor contenido de carbono orgánico en la profundidad de 15 a 30 cm, debido al proceso de lixiviación. Los tratamientos con biosólidos mostraron mayores cantidades de carbonato de calcio y fósforo acorde con las proporciones respectivas, que favorecieron a su vez el incremento del pH, factor que influyó en la baja disponibilidad de aluminio en las parcelas con biosólidos. No obstante, la adición del biosólido generó un aumento paulatino en la salinidad del suelo. Este experimento indicó que el tercer tratamiento (2:1) fue el que generó más efectos benéficos sobre el suelo, debido a que aumentó los contenidos de nutrientes, mejoró las condiciones físicas y se acercó en mayor proporción al suelo de referencia de un bosque adyacente a la cantera.

Palabras claves: biosólidos, carbono orgánico, canteras, nutrientes, recuperación de suelos.

ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate the effect of the sewage sludge in the recovery of physical and chemical properties of soil that has been disturbed by extractive activity and simultaneously to compare that as much were recovered the properties of soil in the different proportions with respect to the reference soil.

For this purpose a one way experimental design with three levels and three repetitions plus a control was performed for a total of 12 randomly distributed plots of 18 m² each. Were made proportions volume/

volume of spoils - sewage sludge this way: a treatment control without sewage sludge content of (1:0) and three treatments with sewage sludge content of in the following proportions: 8:1 (T1) 4:1 (T2) y 2:1 (T3). Results showed that sewage sludge addition to increase the contents the organic carbon, nitrogen, phosphorous, cationic exchange capacity, total bases, moisture and soil porosity, proportional to the doses that were applied. The treatments with sewage sludge showed greater amounts the calcium carbonate and phosphorus according to the applied proportions, which increased the levels of pH, factor that influence in the low availability of aluminium in the parcels with sewage sludge. Nevertheless, addition of sewage sludge generated a gradual increase in soil salinity. This experiment showed that treatment three (2:1) had more beneficial effects on soil properties, because it increased nutrients contents, improved physical conditions and also, it resembled the soil of the nearest forest.

Key words: sewage sludge, organic carbon, quarry, nutrients, recovery of soil.

INTRODUCCIÓN

La actividad minera a cielo abierto que se ha establecido a lo largo de los cerros orientales de Bogotá, cuenta actualmente con 144 predios, desprovistos en gran parte de una cobertura vegetal y una capa orgánico-mineral. Resultado de la explotación queda un sustrato no viable para la comercialización denominado estéril, el cual posee condiciones mínimas de fertilidad, debido a la pérdida de la materia orgánica, y por la alteración en los contenidos de nutrientes y de las condiciones físicas del suelo. El Plan de Ordenamiento Territorial (POT) en su artículo 344, exige el restablecimiento morfológico, paisajístico, ambiental y urbanístico de los predios mineros, a través de la recuperación ecológica como herramienta que hace posible el restablecimiento parcial o total de componentes y/o elementos de los ecosistemas disturbados. Una alternativa para poder recuperar estos suelos, es mediante el uso del descapote que prevalecía antes de la explotación, pero debido a que éste en muchas ocasiones no es almacenado correctamente, se hace imprescindible la utilización de una enmienda orgánica que propicie un mejoramiento en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En este contexto, La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre, genera entre 120 a 140 toneladas diarias de biosólidos (subproducto del tratamiento de

aguas, estabilizado biológicamente), los cuales son dispuestos únicamente como cubierta orgánica en el relleno sanitario Doña Juana. Se ha reportado que los biosólidos aportan materia orgánica, macro y micronutrientes, aumentan la capacidad de intercambio catiónico, la porosidad, la retención hídrica, e incrementan el pH de los suelos ácidos y agilizan el establecimiento vegetal, lo cual minimiza los procesos erosivos (Alcañiz *et al.*, 1998; García, 2001; Pacheco & Patiño, 2003). Dependiendo del origen los biosólidos pueden contener más o menos metales pesados, contaminantes orgánicos y patógenos, los cuales pueden limitar el uso en especial si son empleados para cultivos de consumo directo (EPA, 1999; Alcañiz, 2001; Pacheco & Patiño, 2003). Este trabajo hace parte del proyecto de restauración ecológica de la cantera Soratama, el cual está enmarcado en el convenio 017/2003, celebrado entre el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA) y la Pontificia Universidad Javeriana

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio: Esta investigación fue llevada a cabo en la cantera Soratama, ubicada en los cerros nor-orientales de la ciudad de Bogotá, en la localidad de Usaquén, entre las cotas de 2810 msnm y 2925

msnm, con coordenadas planas 106900 E y 116000 N. La precipitación media anual es de 943.1 mm, y la temperatura media anual es de 12°C. Los suelos se derivan de areniscas, lutitas y arcillolitas de la cordillera Oriental (Dystropepts), y de cenizas volcánicas (Dystrandeps, Placandeps) provenientes de la cordillera Central. Son suelos con niveles de pH ácidos y contenidos bajos en calcio (1.8 meq/100g), potasio (0.10 meq/g) fósforo (2.7 ppm) y nitrógeno (0.232%). Según clasificación del IGAC, estos suelos no son aptos para cultivos, sino que su principal uso está enfocado a la conservación. (Cortés 1976; Delgado & Mejía, 2002; Sánchez *et al.*, 2003).

Diseño experimental y preparación de los tratamientos: El diseño experimental consistió en la conformación de 12 parcelas (4m x 4.5 m x 30 cm, cada una) dispuestas completamente al azar en el terreno. Así mismo, se dejó 1 metro de distancia entre parcela y parcela, en dicho espacio se construyeron zanjas para evacuar las aguas de escorrentía y evitar posible contaminación entre tratamientos. Las proporciones para realizar los diferentes tratamientos se midieron en v/v de estéril y biosólido, de la siguiente manera: Control (C) con una proporción de 1:0, Tratamiento uno (T1) con una proporción de 8:1, tratamiento dos (T2) 4:1, y tratamiento tres (T3) 2:1.

Caracterización física y química del biosólido y de los estériles: Para la adecuada utilización y disposición de los biosólidos se debe tener en cuenta sus diferentes características fisicoquímicas. Por esta razón, se realizó una caracterización tanto del biosólido de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre (PTARS) como de los estériles de la cantera Soratama, (Tabla 1). Así mismo, se referencian los datos del suelo del bosque aledaño a la cantera (Sánchez *et al.*, 2003), ya que uno de los objetivos del trabajo fue

evaluar el nivel de recuperación de las propiedades edáficas tomando como referencia los suelos menos disturbados del área adyacente (Tabla 1).

Toma de muestras en las parcelas: Se efectuaron cuatro muestreos trimestralmente, a partir del momento cero o inicial del experimento cuando fue aplicado el biosólido en los diferentes tratamientos. Para el muestreo de las variables físicas, se seleccionaron 3 puntos al azar de cada parcela de los cuales se extrajeron las muestras mediante un tubo aforado de PVC de 2 pulgadas de diámetro por 50 cm de largo, en las profundidades de 0-10, 10-20, y 20 - 30 cm respectivamente. Debido a la compactación del sustrato, a partir del segundo muestreo sólo se consideraron las profundidades de 0-10 cm y 10 cm en adelante. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Fisiología Vegetal de la Pontificia Universidad Javeriana para determinar los siguientes parámetros: Densidad aparente (método del cilindro), Densidad real (matraz aforado), Humedad (método de gravimetría) y porosidad a través de la siguiente fórmula (Da-Dr/Dr*100). Para el muestreo de las variables químicas, se seleccionaron 5 puntos al azar, a las profundidades de 0-15 cm y 15-30 cm; posteriormente se mezclaron homogéneamente las cinco muestras, para sacar una compuesta por cada profundidad. Para la determinación de las variables químicas en el laboratorio del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) se emplearon las siguientes técnicas: Carbón orgánico (C.O.): Walkley - Black; Nitrógeno (N) total: Kjeldhal; Fósforo (P) disponible: Bray II; CIC (capacidad intercambio catiónico) y bases intercambiables (calcio, magnesio, potasio y sodio): acetato de amonio normal y neutro; Acidez intercambiable (A.I.): con KCl; textura: bouyoucos; conductividad eléctrica (ce): extracto de saturación; pH: potenciómetro.

Tabla 1
Características analíticas del biosólido, estéril y suelo de un relicto de bosque adyacente a la cantera

VARIABLE	BIOSÓLIDO	ESTÉRIL	BOSQUE *
Carbono orgánico %	11,7	0,09	3,1
pH	7,3	5,4	4,9
Nitrógeno total %	1,7	0,003	0,23
Fósforo (ppm)	166	4,3	2,7
Potasio (meq/100g)	0,55	0,02	0,10
Calcio (meq/100g)	67,0	0,20	1,8
Magnesio (meq/100g)	2,4	0,01	1,0
Sodio (meq/100g)	0,61	0,11	0,07
Al intercambiable (meq/100g)	-	1,1	0,55
%Saturación Al	-	75,7	15,4
CIC (meq/100g)	33,8	0,95	9,6
Bases totales (meq/100g) +	70,6	0,3	3,0
Saturación de bases %	SAT	35,8	31,5
Conductividad(dS/m)	4,4	0,13	0,27
% Arena	Orgánico	82,0	79,8
% Limo	Orgánico	10,0	12,1
% Arcilla	Orgánico	8,0	8,1
% de Gravilla	-	6,5	29,7
Clase Textural	Orgánico	AF	AF

* Fuente: Sánchez, *et al.*, 2003.

Análisis de datos: Se realizó un análisis de varianza (ANOVA), que consistió en comparar los promedios de las variables físicas y químicas de los tratamientos T1, T2, T3 y C, para establecer si existían diferencias significativas entre ellos, y de ellos con el control, a lo largo de los nueve meses y entre cada muestreo. Por otro lado, se realizó una comparación adicional entre grupos de medias de los tratamientos, a través de la Prueba de Intervalos Múltiples de Duncan, para especificar entre cuales tratamientos se presentaron diferencias. Para todos los análisis se utilizó el programa estadístico STATGRAPHICS 4.0

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la aplicación de biosólidos sobre las variables fisicoquímicas en los diferentes tratamientos

El porcentaje de carbono orgánico, en cada muestreo fue proporcional de acuerdo a las dosis aplicadas (Figura 1). A su vez, éste tendió a aumentar en el tiempo en todos los tratamientos, excepto en el T3 en los primeros 30 cm de profundidad y en los T1 y T2 de 15 a 30 cm, durante el tercer mes. Dicho aumento fue más significativo ($P < 0.001$) en el tercer y cuarto trimestre, posiblemente porque todavía se encontraba biosólido sin descomponerse y por los restos orgánicos

que aporta la vegetación, de tipo espontánea, que allí se estableció, tal y como lo afirman algunos autores (Alcañiz, 2001; García, 2001). De igual manera, al inicio del experimento, se observó en todos los tratamientos con biosólidos un mayor contenido de carbono orgánico a la profundidad de 15 a 30 cm que de 0 a 15 cm, probablemente por efecto de los procesos de mineralización, translocación y lixiviación (Porta & López, 1993).

La adición de biosólidos generó un incremento significativo ($P < 0.001$) en el pH, en comparación con el control (C), ya que éstas últimas presentan valores de pH ácidos (4.6-5.5) en relación con los valores de ligeramente alcalinos a neutros (7.8-6.6) que contienen los tratamientos con biosólidos (Figura 2). Tal incremento es debido, al aporte de carbonatos de calcio, sodio, potasio y magnesio y fosfatos que contiene el biosólido, los cuales reducen la acidez del suelo.

Los niveles de pH tendieron a disminuir en el tiempo en todos los tratamientos con biosólidos, esto puede ser atribuido a que el efecto estabilizador de los carbonatos desaparece, debido a su agotamiento por efecto de la lixiviación, así mismo, durante la mineralización del carbono orgánico se liberan cationes, que pueden desplazarse

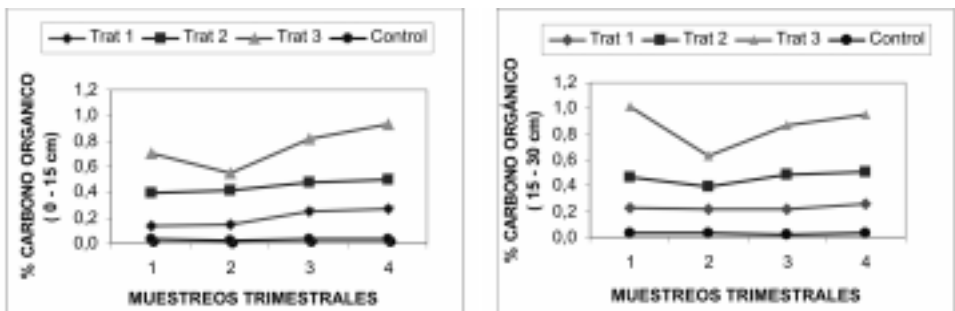


FIGURA 1. Variación del carbono orgánico (%) en la profundidad de 0 a 15 cm y 15 a 30 cm, durante cuatro muestreos trimestrales.

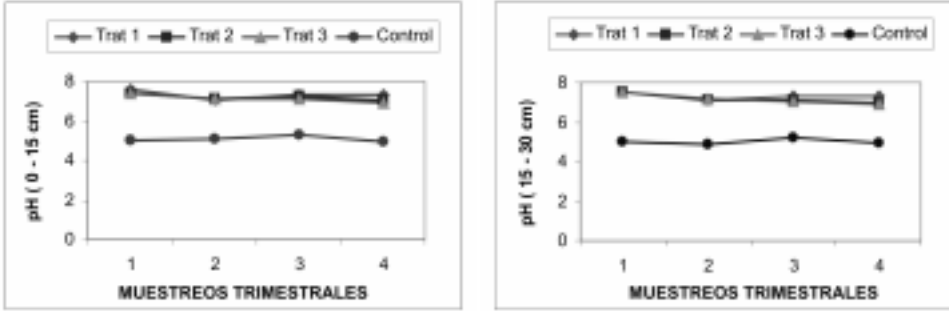


FIGURA 2. Variación del pH en la profundidad de 0 a 15 cm y 15 a 30 cm, durante cuatro muestreos trimestrales.

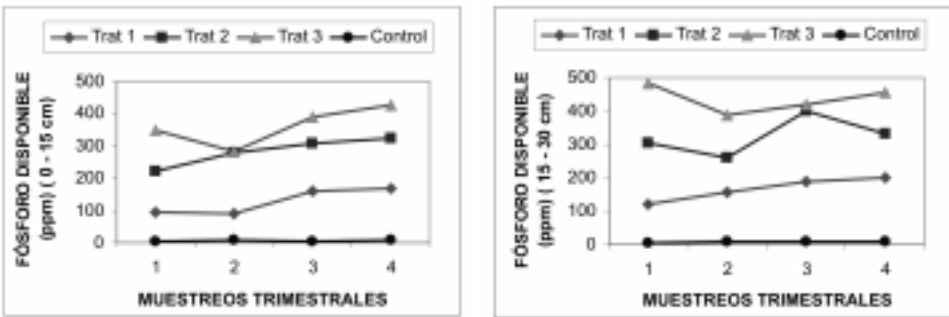


FIGURA 3. Variación del fósforo disponible (ppm) en la profundidad de 0 a 15 cm y 15 a 30 cm, durante cuatro muestreos trimestrales.

a capas inferiores o que al ser absorbidas por las plantas liberan iones de hidrógeno (H⁺), que contribuyen a dicha acidificación (Alcañiz *et al.*, 1996; Alcañiz *et al.*, 1998; Wong *et al.*, 1998; Pacheco & Patiño 2003).

El incremento del pH limitó la solubilidad del ión aluminio en los diferentes tratamientos con biosólidos, no así en las parcelas control que presentaron un pH por debajo de 5.5, lo cual pudo generar que el aluminio estuviera disponible en la solución del suelo. En este sentido, valores muy elevados en la saturación del aluminio (> 60%) según el IGAC, pueden resultar tóxicos para la vegetación e inhibir la absorción de Ca y Mg por las plantas (Garavito,

1979; Espinosa, 2003). Este factor se podría presentar a lo largo del tiempo en todas las parcelas control, con una mayor relevancia a partir del noveno mes, debido a que se registró un porcentaje de saturación del 65%.

Los tratamientos con biosólidos aportaron grandes cantidades de fósforo disponible (> 88.3 ppm), proporcional a las dosis aplicadas, en especial en el T3 en el cuarto trimestre. Contrario a lo que sucedió, en las parcelas control que presentaron cantidades de fósforo muy bajas según el IGAC (< 15 ppm). Dicha disponibilidad se da probablemente porque el fósforo contenido en el biosólido es liberado gradualmente y por el aporte de células

muestras provenientes de la vegetación y los micro y macroorganismos del suelo (Gómez *et al.*, 1994; Wong *et al.*, 1998). Paralelamente, en el primero segundo y cuarto trimestre se evidenciaron diferencias significativas ($P < 0.001$) en todos los tratamientos (Figura 3). Así mismo, el pH al encontrarse entre un rango de 6.5 a 7.5, hace que la solubilidad del fósforo se dé en mayor proporción (Thompson, 1974).

Aunque los valores de nitrógeno total en las profundidades de 0-15 cm y de 15-30 cm, muestran diferencias significativas ($p > 0.001$), no existió a lo largo de los nueve meses de estudio una gran variación de ésta propiedad en los tratamientos con biosólidos. De igual forma, aunque los valores fue-

ron bajos, según el IGAC ($< 0,25\%$), los tratamientos con biosólidos contienen una mayor proporción de nitrógeno en comparación con las parcelas de control (Panagopoulos & Hatzistathis, 1995; Navas *et al.*, 1998; Wong *et al.*, 1998; Alcañiz, 2001) (figura 4).

La capacidad de intercambio catiónico aumentó proporcional y significativamente ($P < 0.001$) en cada muestreo con respecto a la dosis de aplicación del biosólido (Amézquita 2002; Pacheco & Patiño 2003). Por otro lado, se observó que la capacidad de intercambio tiende a fluctuar significativamente ($p < 0.001$) a lo largo del tiempo, posiblemente por efecto del agua de lluvia que lixivia las bases de intercambio (Figura 5). Paralelamente, se evidenció en el sexto

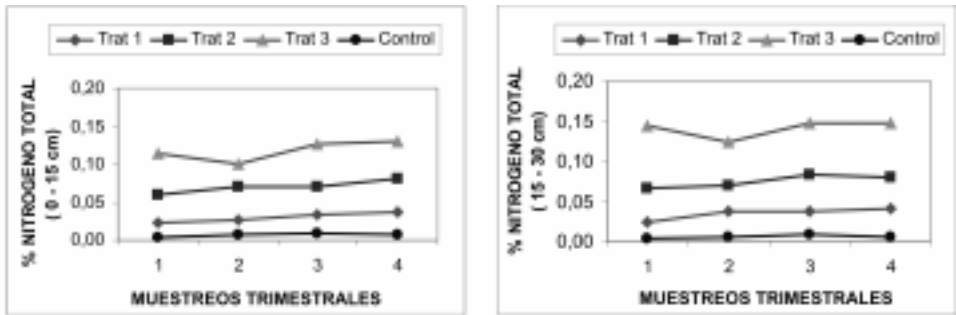


FIGURA 4. Variación del nitrógeno total (%) en la profundidad de 0 a 15 cm y 15 a 30 cm, durante cuatro muestreos trimestrales.

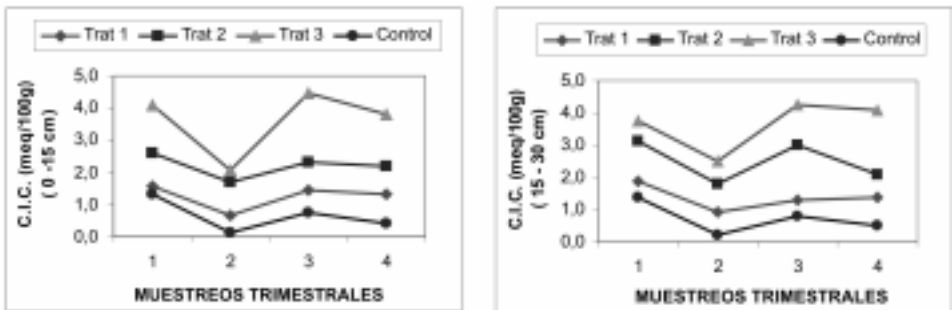


FIGURA 5. Variación de la capacidad de intercambio catiónico (meq/100g) en la profundidad de 0 a 15 cm y 15 a 30 cm, durante cuatro muestreos trimestrales.

trimestre un aumento significativo ($P < 0.001$) en la cantidad de cationes, lo cual favorece el almacenamiento de los nutrientes (Ca, Mg, K, Na) que las plantas necesitan a través del ciclo de desarrollo.

Los contenidos de arcillas son aportados por el estéril (8.0%), mientras que la materia orgánica es aportada principalmente por el biosólido (11.7 %). En este sentido, aunque las dosis de biosólidos fueron bajas en todos los tratamientos, se aprecia notablemente una mayor capacidad de intercambio catiónico, en comparación con las parcelas de control. Así mismo, la capacidad catiónica en este caso fue influenciada en mayor proporción a la materia orgánica que a la fracción arcillosa, posiblemente porque el tipo de arcillas que dominan el sustrato son caolinitas que fijan pocas bases (Thompson, 1974; Navarro & Navarro, 2002).

Se observó en todos los muestreos un incremento significativo ($p < 0.001$) de la conductividad eléctrica en el T3, seguido del T2 y T1. Por otro lado, se registra en el tercero y noveno trimestre un aumento significativo ($P < 0.001$) de la conductividad eléctrica en los T3, T2 y T1, posiblemente por la mineralización que sufre la materia orgánica o por la adición de productos químicos que contiene el biosólido durante el tratamiento en las Plantas de Aguas Residuales (Navas *et al.*, 1998; Wong *et*

al., 1998; Arcak *et al.*, 2000). Paralelamente, se presentó una disminución significativa ($P < 0.001$) en el sexto trimestre, en todos los tratamientos con biosólidos, debido posiblemente a la frecuentes lluvias que se registraron para esta época (92.2 mm), las cuales pudieron lavar las sales que se acumularon en el suelo (Figura 6).

De igual forma, es posible, que en el T1 y T2, no se vea limitado el establecimiento vegetal, ya que para el tercer trimestre en estos tratamientos hubo un mejor desarrollo de la cobertura vegetal como lo demuestran los resultados obtenidos por Ochoa (2005) para la misma época, quien registró un porcentaje de cobertura de 0,15% en el T1 y 0,44% en el T2, mientras que en el T3, sólo obtuvo un porcentaje de 0,003%, lo cual indica que este tratamiento podría estar limitando inicialmente el desarrollo de la vegetación, factor que sería temporal ya que el contenido de sales con el tiempo se va lavando.

Los valores de la densidad aparente en la profundidad de 0 a 10 cm, y 10 cm en adelante, en todos los tratamientos con biosólidos presentan diferencias significativas ($P < 0.001$), además tienden a disminuir significativamente ($P < 0.001$) en el tercer trimestre, posiblemente por la integración del biosólido con la fracción mineral, y en el noveno trimestre, por efectos del incremen-

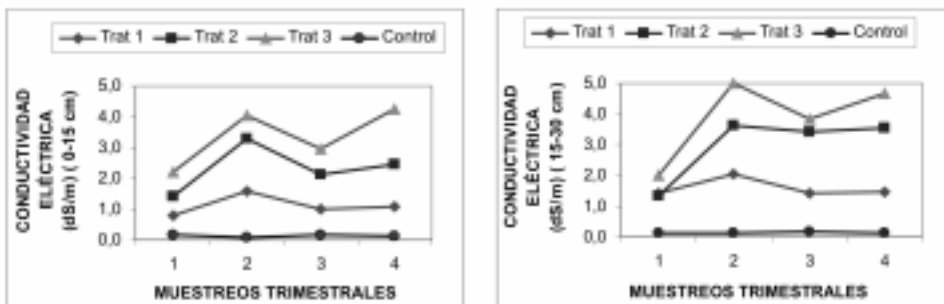


FIGURA 6. Variación de la conductividad eléctrica (dS/m) en la profundidad de 0 a 15 cm y 15 a 30 cm, durante cuatro muestreos trimestrales.

to de la materia orgánica que aportó principalmente la vegetación (Figura 7). Debido a que el concepto de la densidad aparente incluye el espacio poroso total, puede establecerse una relación entre dicha densidad y la porosidad. En este sentido, se presenta una tendencia de aumento significativo ($P < 0.001$) en el porcentaje de poros en todos los tratamientos a la profundidad de 0 a 10 cm, durante el tercer y noveno trimestre, lo cual está asociado con la disminución de la densidad aparente en estos mismos meses. De igual manera, se presentó a lo largo de todos los muestreos una mayor porosidad en el T3, seguido del T2, T1 y C, y a su vez se presentan diferencias significativas ($P < 0.001$) en todos los tratamientos en el primero, segundo y cuarto muestreos trimestrales (figura 8).

Los análisis muestran que entre mayor sea la cantidad de biosólido aplicado al suelo, mayor será el contenido de humedad. De acuerdo a la clasificación de Montenegro (2003), las parcelas control presentan unos valores muy bajos ($< 5\%$), a comparación de los T1 y T2 que presentan valores bajos (5 - 15 %), mientras que los T3 presentan unos valores de bajos (5-15%) a medios (15-25%).

Por otro lado, el porcentaje de humedad en la profundidad de 0-10 cm, tiende a aumentar significativamente ($P < 0.001$) en el tiempo en todos los tratamientos, excepto en el T1, que presenta variaciones a lo largo del tiempo. De igual manera, en la profundidad de 10 cm en adelante, se presenta en el tiempo un incremento de la hume-

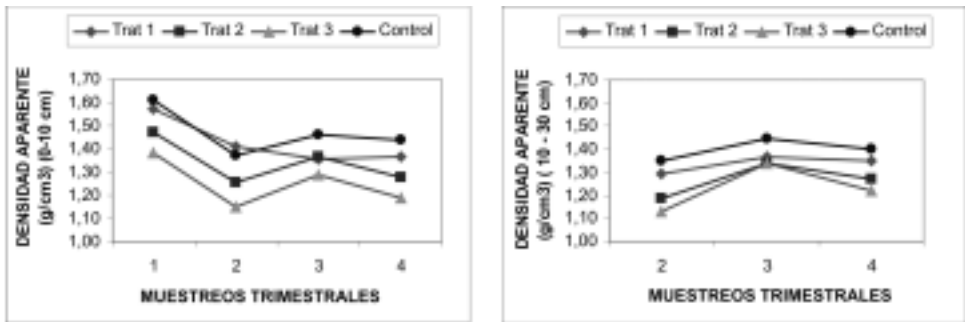


FIGURA 7. Variación de la densidad aparente (g/cm^3) en la profundidad de 0 a 10 cm y entre 10 y 30 cm, durante cuatro muestreos trimestrales.

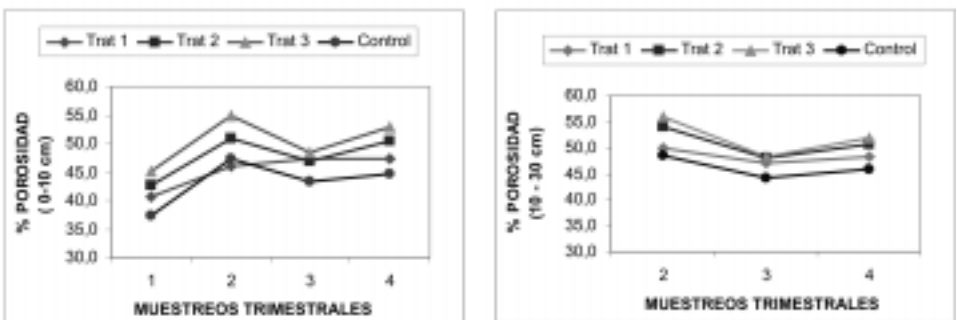


FIGURA 8. Variación de la porosidad (%) en la profundidad de 0 a 10 cm y entre 10 y 30 cm, durante cuatro muestreos trimestrales.

dad en todos los tratamientos, lo cual es mayor en el T3, y presenta diferencias significativas ($P < 0.001$) durante el primero, tercero y cuarto muestreo trimestral con los T1 T2 y C. Igualmente, se presentan diferencias significativas ($P < 0.001$) entre todos los tratamientos en las profundidades de 10 a 20 cm y 20 a 30 cm, siendo mayor dicha humedad en la profundidad de 10 cm en adelante, debido a que el biosólido se asentó y posiblemente porque a esta profundidad no existe tanta evaporación como puede suceder de 0-10 cm (Figura 9).

Comparación de las propiedades químicas entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque

En la tabla. 2, se aprecia que los contenidos de materia orgánica, nitrógeno total y potasio, en todos los tratamientos con biosólidos, incluido el control y el suelo del bosque son bajos según calificación IGAC. Sin embargo, el T3 al contener una mayor proporción de estos nutrientes en ambas profundidades, en comparación con los otros tratamientos, fue el que más se acercó al valor de referencia del suelo del bosque. Así mismo, todos los tratamientos con biosólidos al contener altas cantidades de calcio y fósforo, y al incrementarse la con-

ductividad eléctrica, sobrepasaron el valor del suelo del bosque que contiene bajas proporciones de tales elementos. De igual manera, los tratamientos con biosólidos aumentaron el pH del suelo a valores neutros, lo cual favorece la retención de algunos metales y la disponibilidad de los nutrientes, en comparación con los controles y el suelo del bosque que contienen un pH ácido.

CONCLUSIONES

El biosólido favoreció el incremento del pH, de valores ácido a ligeramente alcalinos (6.6 - 7.3) y neutros a lo largo del tiempo (6.1 - 6.5), en comparación con las parcelas control y el suelo del bosque que presentan unos valores de extremadamente ácido (4.6 - 5.0) a muy fuertemente ácido (5.1 - 5.5).

Según las proporciones aplicadas, el biosólido aporta grandes cantidades de fósforo y de calcio, que se evidencian más en el tratamiento tres (T3). Por lo tanto, el aumento de estos nutrientes y del pH pueden ser las contribuciones más significativas del biosólido como enmienda orgánica en la recuperación de suelos disturbados por actividad minera.

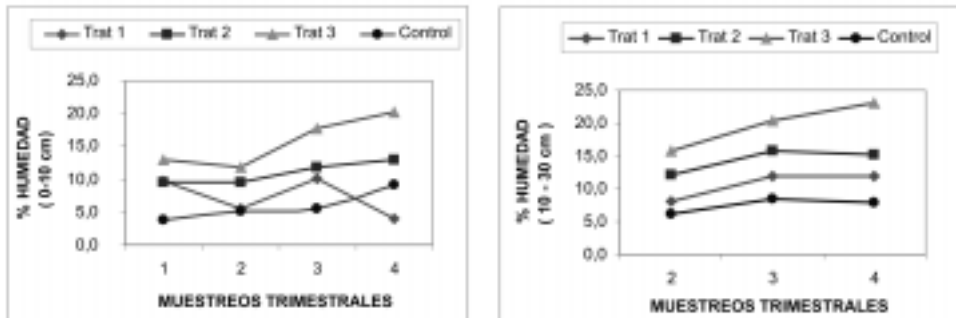


FIGURA 9. Variación de la humedad (%) en la profundidad de 0-10 cm y entre 10 y 30 cm durante cuatro muestreos trimestrales.

Tabla 2
Comparación de las propiedades químicas durante el noveno mes, entre los tratamientos con biosólidos, el control y el suelo del bosque, según calificación del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)

VARIABLE	Prof (cm)	C	T1	T2	T3	Bosque *	Calificación (IGAC)
Materia	0-15	0,052	0,47	0,87	1,61	3,1	< 5
Orgánica %	15-30	0,058	0,44	0,88	1,66		>10
Nitrógeno	0-15	0,008	0,036	0,08	0,13	0,23	< 0,25 Bajo
Total %	15-30	0,005	0,04	0,08	0,15		> 0,5 Alto
Potasio (meq/100gr)	0-15	0,01	0,03	0,04	0,07	0,1	< 0,15 Bajo
	15-30	0,02	0,03	0,04	0,06		> 0,35 Alto
pH	0-15	5,0	7,3	7,0	6,9	4,9	4.6 - 5.0 (ácido)
	15-30	5,0	7,3	7,0	6,9		6.6 - 7.3 (neutro)
Fósforo (ppm)	0-15	7,1	169	323	427	2,7	< 15 Bajo
	15-30	6,5	201	333	454		> 40 Alto
Calcio (meq/100gr)	0-15	0,09	3,5	5,9	10,2	1,8	< 3 Bajo
	15-30	0,09	3,4	6,0	12		> 6 Alto
Conductividad eléctrica (αS/100gr)	0-15	0,12	1,07	2,47	4,27	0,27	0 - 2 Nula
							2 - 4 Escasa
15-30	0,12	1,47	3,53	4,67	4 - 8 Moderada		
					8 - 16 Alta		

* Fuente: Sánchez *et al.*, 2003.

T1 = (8 estéril: 1 biosólido)

T2 = (4 estéril: 1 biosólido)

T3 = (2 estéril: 1 biosólido)

C = (1 estéril: 0 biosólido)

No se presentó aluminio disponible en los tratamientos con biosólidos, ya que estos contribuyen a aumentar el pH, lo que inhibe la solubilidad del aluminio, que podría generar efectos tóxicos a la vegetación.

Entre más biosólido sea aplicado al suelo, mayor será el porcentaje de porosidad, y de humedad, lo cual contribuirá a mejorar el movimiento del agua, el aire y de los nutrientes del suelo, que influyen en el desarrollo radicular y la producción de las plantas.

El biosólido podría desfavorecer temporalmente el desarrollo de la vegetación, ya que incrementa la conductividad eléctrica, debido a la alta cantidad de sales solubles que contiene.

Según los datos encontrados en este experimento el mejor tratamiento para recuperar suelos areno-franco, corresponde al tratamiento tres (2:1v/v), debido a que contiene una mayor cantidad de nutrientes, mejora las condiciones físicas, y se acerca en mayor proporción a los suelos del bosque no disturbado.

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento Técnico y Administrativo del Medio Ambiente (DAMA) por la financiación de la investigación, a la Empresa Bogotana de Aguas y Saneamiento Ambiental (BAS) por la cofinanciación y apoyo en la investigación, a Oriol Ortiz del Centre Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF) de Cataluña, por sus valiosos aportes y a los compañeros de la Escuela de Restauración Ecológica (ERE) por sus contribuciones en el montaje del experimento y discusión.

LITERATURA CITADA

ALCAÑIZ, J.M. 2001. *Utilización de lodos de depuradoras urbanas en la restauración de canteras*. Universidad Autónoma de Barcelona. 10 pp.

ALCAÑIZ, J.M.; COMELLAS, L.; PUJOLÁ, M. 1996. *Manual de restauración d'activitats extractives amb fangs de depuradora*. Recuperación de terrenys marginals. Junta de Sanejament, Generalitat de Catalunya. 68 pp.

ALCAÑIZ, J.M.; ORTIZ, O.; COMELLAS, L.; PUJOLÁ, M. & SERRA, E. 1998. *Utilización de lodos de depuración en la rehabilitación de suelos de canteras*, Ingeopres, Barcelona-España, 59: 28-34.

AMÉZQUITA, C. 2002. *Evaluación del uso del biosólido de la planta El Salitre como sustrato en procesos de recuperación de suelos y revegetalización en la cantera La Fiscala*. Tesis de grado. Universidad de la Salle. Bogotá.

ARCAK, S.; KARACA, A.; HAKTANIR, K. 2000. *Investigations on sewage sludge: chemical composition and effects on some chemical properties of soil*. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Ankara University, 6 pp.

BRADSHAW, A.D. 1997. *Restoration of mined lands using natural processes*. Ecological Engineering 8: 255-269.

CORTÉS, L.A. 1976. *Aptitud de uso de los suelos de la Sabana de Bogotá y sus alrededores*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 26 pp.

DELGADO, A. & MEJÍA, M.V. 2002. *Diagnóstico de la actividad extractiva en la localidad de Usaqué, Bogotá*. Documento Interno del Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). 27 pp.

Environmental Protection Agency (EPA). 1999. *Control of pathogens and vector*

- attraction in sewage sludge*. EPA/625/R-92/013. Cincinnati, Ohio. EUA.
- ESPINOSA, J. 2003. Encalado en suelos tropicales, en *Manejo integral de la fertilidad del suelo*, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, 155-165.
- GARAVITO, F. 1979. *Propiedades químicas de los suelos*. 2ª edición. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Bogotá. 321 pp.
- GARCÍA, C. 2001. Nuevos usos para el reciclado en el suelo de residuos urbanos: Biocontrol en agricultura sostenible: recuperación de suelos degradados. I Encuentro Internacional de Gestión de Residuos Orgánicos en el Ámbito Rural Mediterráneo. Departamento de Conservación de Suelos y Agua y Manejo de Residuos Orgánicos. Murcia-España. 7 pp.
- GÓMEZ, R.; MORAL, J.; NAVARRO, J.; GARCÍA, T. & MATAIX, J. 1994. Efecto fertilizante NPK de un lodo de depuradora. I Congreso de la Sociedad Española de Agricultura Ecológica. División de Agronomía, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante. On line: [www. Agroecología.net/congresos/toledo/35.pdf](http://www.Agroecología.net/congresos/toledo/35.pdf). 6 pp.
- MONTENEGRO, H. 2003. Propiedades físicas de los suelos en relación con la fertilidad, en *Manejo integral de la fertilidad del suelo*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 1-20.
- NAVARRO, G. & NAVARRO, S. 2002. *Química agrícola*. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. España. 488 pp.
- NAVAS, A. BERMÚDEZ, F & MACHIN, J. 1998. Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols. Departamento de Edafología. Estación Experimental de Aula Dei. Zaragoza. España, *Geoderma* 87: 123-135.
- OCHOA, A. 2005. *Efecto de la aplicación de biosólidos sobre el desarrollo de la vegetación en las primeras etapas sucesionales, en la cantera Soratama, localidad de Usaquén, Bogotá D.C.* Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- PACHECO, L.F. & PATIÑO, M. 2003. *Evaluación de la aplicación de biosólidos producidos en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre en la revegetación del relleno sanitario Doña Juana*. Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- PANAGOPOULOS, T. AND HATZISTATHIS, A. 1995. The role of forest topsoil and sewage sludge in reclamation of strip-mined land in Ptolemaida, Greece.
- PORTA, J. & LÓPEZ, M. 1993. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid, España, Ediciones Mundiprensa, 849 pp.
- SALAMANCA, B. & CAMARGO, G. 2002. Protocolo Distrital de Restauración Ecológica: guía para la restauración de los ecosistemas nativos en las áreas rurales de Santa Fe de Bogotá. Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). 288 pp.
- SÁNCHEZ, J.; MORENO, O. & GAMBA, J. 2003. *Caracterización de la vegetación y de los suelos en la cantera Soratama-Usaquén*. Documento Interno. (DAMA). Bogotá. 202 pp.
- THOMPSON, L. 1974. *El suelo y su fertilidad*, 3ª ed. Nueva York, 407 pp.

WONG, J. LAI, K. FANG, M. & MA, K. 1998.
*Effect of sewage sludge amendment
on soil microbial activity and nutrient
mineralization.* Environment Interna-

tional, Hong Kong, Baptist University.
24: 935-943.

Recibido: 30-11-2006
Aprobado: 15-05-2007