

Efecto de aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar

Effect of biosolids application on soil physical properties of a sugarcane crop

Waldemar Peñarete M.^{1*}, Jorge Silva-Leal², Norberto Urrutia C.¹ Martha Daza T.¹,
Patricia Torres-Lozada²

¹ Universidad del Valle, Escuela EIDENAR, Facultad de Ingeniería, Área de Ingeniería Agrícola y Recursos Hídricos, ² Universidad del Valle, Escuela EIDENAR, Facultad de Ingeniería, Área de Ingeniería Sanitaria y Ambiental,

*Autor para correspondencia: waldemarp71@hotmail.com

Rec.: 08.08.12 Acep.:20.08.13

Resumen

Se evaluó el efecto de la aplicación de biosólidos resultantes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Cañaveralejo, Cali, Colombia, sobre las propiedades físicas (densidad aparente, porosidad y estabilidad estructural) de un suelo Vertic endoaquepts con características vérticas, sembrado con caña de azúcar, así como la influencia sobre el rendimiento del cultivo. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con dos repeticiones y ocho tratamientos: dos testigos (suelo sin biosólido y sin fertilización mineral (To)) y suelo con fertilización mineral (FM) y seis tratamientos con biosólidos aplicando 100% y 200% de la dosis de nitrógeno requerida por el cultivo así: BD100 y BD200 biosólidos deshidratados, BST100 y BST200 biosólidos deshidratados secados térmicamente y BA100 y BA200 biosólidos alcalinizados. Los resultados mostraron cambios ligeros en las propiedades físicas del suelo y en el rendimiento del cultivo. Se observó una tendencia en los tratamientos con biosólidos de disminuir la densidad aparente (de 1.33 Mg m⁻³ a 1.29 Mg m⁻³) y la microporosidad (48.8% a 45.8%) y de aumentar la estabilidad estructural (1.8 mm a 3.1 mm) y la macroporosidad (2.0% a 5.0%).

Palabras clave: Densidad aparente, estabilidad estructural, porosidad, propiedades vérticas, rendimiento del cultivo.

Abstract

The effects of the biosolids applications on physical properties (bulk density, porosity and soil structural stability) in a soil of sugarcane crop and crop yield were evaluated. The experiment was carried out in the in the Cañaveralejo wastewater treatment plant at Cali, Colombia using a randomized complete block experimental design, two replications and eight treatments: (soil without biosolids application and without mineral fertilization (To), and soil with mineral fertilization (FM)), and six treatments with biosolids application to 100% and 200% of the dose required nitrogen by the crop as follows: BD100-BD200 dehydrated biosolids, BST100-BST200 thermally dried biosolids, and BA100-BA200 alkalinized biosolids. Results showed that significant differences were not found in soil physical properties and crop yield but trends to decrease the values of bulk density (1.33 Mg m⁻³ to 1.29 Mg m⁻³) and microporosity (48.8% to 45.8%), and to increase the values of structural stability (1.8 mm to 3.1 mm) and macroporosity (2% to 5%) were identified, which favor the water-air relation in the soil.

Key words: Bulk density, crop yield, porosity, structural stability, vertic properties.

Introducción

En el marco de la política de preservación de la calidad del agua se han construido Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales - PTAR las cuales generan subproductos sólidos o semisólidos (lodos y/o biosólidos) según el tipo de proceso de tratamiento y el estado de digestión de los mismos (WEF, 1998). La aplicación de biosólidos en el sector agrícola como enmiendas o fertilizantes es una práctica comúnmente empleada en países en desarrollo, por su contenido de materia orgánica y de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio (Comisión Europea, 2010). Existen estudios sobre los beneficios de la aplicación de estos subproductos sobre las propiedades físicas del suelo, entre ellos: disminución de la densidad aparente (Tsadilas *et al.*, 2005), aumento en la porosidad total (Civeira y Lavado, 2006) y en la estabilidad estructural (Ojeda *et al.*, 2008). Filizola *et al.* (2008) encontraron efectos negativos como dispersión de arcillas y daño en la estructura del suelo y Camilotti *et al.* (2006) no observaron cambios en el suelo por la aplicación de biosólidos.

Las investigaciones realizadas en Colombia se basan principalmente en la utilización de biosólidos como fuente de materia orgánica (M.O.) y nutrientes en la recuperación de suelos degradados (Torres *et al.*, 2007); no obstante, son pocos los estudios enfocados hacia la medición del efecto sobre las propiedades físicas como densidad aparente, estabilidad estructural y retención de humedad (Ramírez y Pérez, 2006). El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la aplicación de biosólidos sobre el rendimiento del cultivo y algunas propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia.

Materiales y métodos

Sitio de estudio y establecimiento del experimento

La caña de azúcar se cultivó en las instalaciones de la PTAR-C, (3° 28' 17" N, 76° 28' 52.8" O, a 967 m.s.n.m.), en un suelo Vertic endoaquepts en zona agroecológica bosque seco tropical, con pendiente < 1%, tempera-

tura promedio de 24 °C y precipitación pluvial anual entre 1000 y 1500 mm (IGAC, 2006a). Se realizó una caracterización inicial de las propiedades químicas y físicas del suelo: pH, carbono orgánico - CO, nitrógeno total Kjendahl, N-NH₄⁺, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻, P total, bases intercambiables (Ca⁺², Mg⁺², K⁺ y Na⁺), capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) calculada a partir de la suma de bases intercambiables, porcentaje de magnesio intercambiable (PMgI) calculado como la relación entre el Mg disponible y la CICE; propiedades físicas como densidad aparente, densidad real, porosidad total, macroporosidad y microporosidad, estabilidad estructural expresada mediante el diámetro ponderado medio (DPM) y textura, siguiendo los protocolos del IGAC (2006b).

Los biosólidos provenían de las instalaciones de la PTAR-C, que opera con la modalidad de tratamiento primario avanzado (TPA) y la línea de tratamiento de lodos consta de espesamiento, digestión anaerobia y deshidratación mecánica en filtros prensa (BD); igualmente se evaluaron los BD sometidos a procesos adicionales de reducción de patógenos (secado térmico a 60 °C durante 13 h (BST) y tratamiento alcalino con 9% de cal viva en peso seco (BTA)) (Silva *et al.*, 2013). Los biosólidos fueron caracterizados en términos de pH, humedad, CO, N Total, N-NH₄⁺, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻, P total, K⁺, Ca⁺² y Mg⁺².

La fertilización del cultivo se calculó con base en el análisis inicial del suelo, las necesidades del cultivo, el aporte de nitrógeno del biosólido y su tasa de mineralización (USDA, 2011). La fertilización mineral (FM) se realizó 3 meses después de la siembra; la fertilización con biosólidos se hizo 1 mes antes de la siembra, localizada en el fondo del surco. La preparación del suelo consistió en dos pasadas de arado de discos y surcado para el arreglo experimental. La semilla de caña de azúcar empleada fue de la variedad CC-8592 (Cenicaña-Colombia), la cual fue distribuida dentro de cada surco y tapada con una capa de suelo de aproximadamente 10 cm. El riego aplicado se hizo de acuerdo con los requerimientos hídricos del cultivo con utilización del sistema de aplicación por surcos con tubería de ventanas.

Al comienzo del ensayo y a 4, 10 y 12 meses después de la siembra (m.d.s.) se midieron: la densidad aparente (DA) (cilindro), la porosidad total (PT), la macroporosidad (MP), la microporosidad (MIP) (porosímetro), la estabilidad estructural del suelo (método de Yoder modificado) y el rendimiento a la cosecha del cultivo en t/ha. Para la determinación de la DA y las porosidades se tomaron dos muestras de suelo no disturbado, mediante uso de barreno y cilindros de acero inoxidable de 5 cm³, dentro de los 10 m centrales de cada surco en el área de influencia del cultivo, a una profundidad de 12 cm para un total de seis muestras por tratamiento. Para las pruebas de estabilidad estructural se tomó una muestra compuesta en cada surco para un total de tres muestras por tratamiento (IGAC, 2006b). El rendimiento del cultivo se determinó con el peso en campo del total de

caña en cada surco por tratamiento (20 m x 1.5 m) el cual se extrapoló a producción/ha.

El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar, con dos repeticiones, cada uno formado por ocho tratamientos y cada tratamiento compuesto por tres surcos de 20 m de largo x 1.5 m de ancho (Cuadro 1).

Se hicieron análisis de estadística descriptiva y de varianza con componente de submuestreo y un nivel de significancia del 95% (P < 0.05) para las variables evaluadas. Las diferencias entre medias fueron determinadas por la prueba de Tukey con P < 0.05, con el programa estadístico R versión 2.15.0.

Resultados y discusión

Caracterización del suelo y biosólidos

El análisis inicial del suelo aparece en el Cuadro 2, donde se observa que el pH es

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos y dosis utilizados.

Tratamiento	Descripción	Biosólido (t/ha)
To	Testigo	0
FM ^a	Fertilización mineral	0
BD100	Biosólido deshidratado ^b	11.6
BD200	Biosólido deshidratado ^c	32.2
BST100	Biosólido secado térmico ^b	8.5
BST200	Biosólido secado térmico ^c	17.0
BA100	Biosólido alcalinizado ^b	23.8
BA200	Biosólido alcalinizado ^c	47.6

a. Fertilización mineral convencional con 180, 100 y 110 kg/ha de urea (46% de N), superfosfato triple (46% de P₂O₅) y cloruro de potasio (60% de K₂O), respectivamente.

b. Biosólido con la dosis de nitrógeno del 100% requerido por el cultivo de la caña de azúcar.

c. Biosólido con la dosis de nitrógeno del 200% requerido por el cultivo de la caña de azúcar.

Cuadro 2. Propiedades fisico-químicas del suelo al comienzo del ensayo.

Característica	Valor ^a	Característica	Valor ^a
pH (unidades)	8.01	Na ⁺ (cmol(+)/kg)	0.43
		CICE (cmol(+)/kg)	31.74
C-Orgánico (g/kg)	11.63	PMgI (%)	28.6
N-Total Kjendahl (mg/kg)	-	Densidad real (Mg/m ³)	2.65
N-NH ₄ ⁺ (mg/kg)	8.1	Densidad aparente (Mg/m ³)	1.33
N-NO ₂ ⁻ (mg/kg)	1.7	Porosidad (%)	47.83*
N-NO ₃ ⁻ (mg/kg)	4.4	Macroporosidad (%)	6.55*
P-Total (mg/kg)	7.6	Microporosidad (%)	40.62*
K ⁺ (cmol(+)/kg)	0.51	Estabilidad estructural-DPM (mm)	2.65
Ca ⁺² (cmol(+)/kg)	21.75	Arena, limo y arcilla (%)	29.8 – 16.8 – 54.4
Mg ⁺² (cmol(+)/kg)	9.05	Textura	Arcillosa

a. Valores promedio de cuatro repeticiones.

alcalino, con alta CICE, contenidos medios a altos de N, P y K y alto contenido de bases intercambiables, pero con desbalance en las relaciones Ca/Mg (2.4:1) menor a la ideal (3:1), y Mg/K (17.7:1) superior a la ideal (6 – 8) lo que puede llevar a antagonismos que afectan la absorción de estos nutrientes por parte de las plantas y consecuentemente el rendimiento del cultivo de caña de azúcar (Castro y Gómez, 2010). Además, el PMgI es mayor a 25% en el complejo de cambio, lo que favorece la dispersión de los agregados y afecta la estructura del suelo.

Los valores de densidad real, DA y PT conformada principalmente por MIP (85% de la PT) son característicos de este tipo de suelos. No obstante, este suelo presentó grietas que evidenciaban sus propiedades vérticas y presencia de arcillas expansivas; su textura es arcillosa, muy pobremente drenado, limitado por encharcamientos periódicos, con nivel freático fluctuante de acuerdo con el ciclo estacional (IGAC, 2006a).

Las características de los biosólidos empleados se observan en el Cuadro 3 y muestran que la mayoría de sus componentes estaban dentro de los parámetros establecidos para este tipo de materiales (Potisek *et al.*, 2010). Los contenidos de M.O. y de nutrientes, especialmente N y K, hacen que estos materiales tengan gran importancia para el aprovechamiento agrícola; a pesar de esto, valores altos de pH pueden crear

restricciones para su uso en suelos básicos, ya que nutrientes como el fósforo y algunos microelementos disminuyen su disponibilidad para las plantas, a medida que aumentan la concentración de Ca y el valor de pH (Castro y Gómez, 2010).

Efecto de la aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas

Los valores de DA encontrados se incluyen en el Cuadro 4 y se encuentran en el rango reportado en los estudios de suelos en la zona (Carbonell, 2010); sin embargo, se debe tener en cuenta que densidades por encima de 1.4 Mg/m³ se consideran altas para los suelos de texturas finas (Pinzón, 2009).

En general, estos resultados coinciden con investigaciones realizadas por Barbosa *et al.* (2007) y Dornelas *et al.* (2011) quienes con aplicaciones más altas (entre 12 y 200 t/ha de biosólidos) a las empleadas en este estudio por periodos de hasta 5 años, no encontraron cambios significativos en las propiedades físicas de los suelos, incluida la DA.

Para los tratamientos con BD100, BD200 y BA100, BA200 se encontró que a mayor dosis de biosólido menores fueron los valores hallados, siendo esto más evidente al cuarto mes después de la siembra. Esto demuestra que a mayor contenido de M.O. en el suelo, los valores de DA disminuyen (Melo *et al.*, 2004) generando mayor porosidad y creando mejores condiciones para el desarrollo de las

Cuadro 3. Características químicas de los biosólidos aplicados.

Parámetro	Deshidratado	Secado Térmico	Alcalinizado
	BD	BST	BA
pH (unidades)	7.6	7.8	12.0
Carbono orgánico (g/kg)	243.1	257.4	218.2
N-Total Kjendahl (mg/kg)	25035	25700	17970
N-NH ₄ ⁺ (mg/kg)	1824.7	1130.7	133.08
N-NO ₂ ⁻ (mg/kg)	0	0	0
N-NO ₃ ⁻ (mg/kg)	33.8	17.8	34.5
P-Total (mg/kg)	14.5	14.3	9.7
K ⁺ (mg/kg)	950	960	720
Ca ⁺² (g/kg)	35.4	31.93	137.51
Mg ⁺² (g/kg)	5.47	5.66	5.19
Tasa aplicada (t/ha)	11.6	8.5	23.8
Tasa de mineralización (%)	33	45.7	23

Cuadro 4. Promedios de densidad aparente con aplicación de biosólidos durante el ciclo de cultivo de caña de azúcar.

Tratamientos	Tiempo desde la siembra (meses)					
	4		10		12	
	Prom. (Mg/m ³)	C.V. (%)	Prom. (Mg/m ³)	C.V. (%)	Prom. (Mg/m ³)	C.V. (%)
To	1.24	6.6	1.26	3.5	1.36	6.7
FM	1.36	8.3	1.24	8.7	1.38	6.9
BD100	1.34	7.6	1.29	5.1	1.34	6.6
BD200	1.30	7.7	1.35	7.4	1.36	6.2
BST100	1.27	7.4	1.28	6.2	1.29	6.6
BST200	1.33	9.3	1.29	5.0	1.33	6.2
BA100	1.39	9.7	1.30	3.9	1.38	8.9
BA200	1.32	6.7	1.31	4.0	1.37	6.9
F =	16.179		15.047		0.886	
P =	0.159		0.194		0.527	
g.l.	7		7		7	

C.V. coeficiente de variación.

raíces de las plantas (Pinzón, 2009). En el caso de los tratamientos con BST el comportamiento fue inverso; encontrando los valores más bajos de DA en la dosis menor del tratamiento, lo que puede estar relacionado con una alta tasa de mineralización y baja dosis de biosólido aplicada (Uribe *et al.*, 2003). Por otro lado, a los 12 m.d.s. los valores de DA aumentaron en todos los tratamientos, incluyendo el testigo, con respecto a los valores en los anteriores tiempos de muestreo debido, posiblemente, a que este tipo de suelos tiende a compactarse naturalmente. Los cambios en el comportamiento de la DA versus las condiciones climáticas presentadas a lo largo de la fase experimental, mostraron que en los primeros meses después de la siembra y en los dos últimos, la precipitación fue superior a la evaporación (243 mm vs. 115 para el mes más crítico), lo que ocasionó saturación del suelo que por sus características texturales y presencia de arcillas expandibles 2:1, pudo generar aumentos en la densidad. Para el muestreo 10 m.d.s., las temperaturas fueron más altas, por tanto la humedad del suelo y la DA disminuyeron en todos los tratamientos.

En términos generales, el tratamiento con fertilización mineral (FM) presentó valores de DA superiores que los tratamientos con biosólidos, excepto a los 10 m.d.s., cuando

ésta fue más baja. Lo anterior posiblemente fue debido a la presencia de grietas que favoreció el aumento del volumen de poros y la reducción del valor de la DA (Torrente, 2007), lo que indicaría que el muestreo con cilindros en suelos arcillosos expansivos probablemente no es el método más apropiado para la determinación de DA (Pla, 2010).

Los resultados obtenidos no presentaron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre tratamientos para los tres tiempos de muestreo evaluados, lo que indica que las diferencias en los valores obtenidos se debieron a factores distintos a los tratamientos aplicados. De acuerdo con Macedo *et al.* (2006) algunos cambios en las propiedades físicas del suelo ocurren gradualmente en periodos muy largos y están en función de factores climáticos, edáficos y de manejo, principalmente.

En la Figura 1 se presentan los valores de PT, los que están dentro de los rangos aceptables para este tipo de suelo (aprox. 50%) (Jaramillo, 2002). Al igual que con la DA no se encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre tratamientos en los meses de muestreo, lo cual indica que la aplicación de biosólidos en el periodo de cultivo de la caña de azúcar no cambió los valores de PT, tal como lo demostraron Melo *et al.* (2004), Macedo *et al.* (2006) y Dornelas *et al.* (2011).

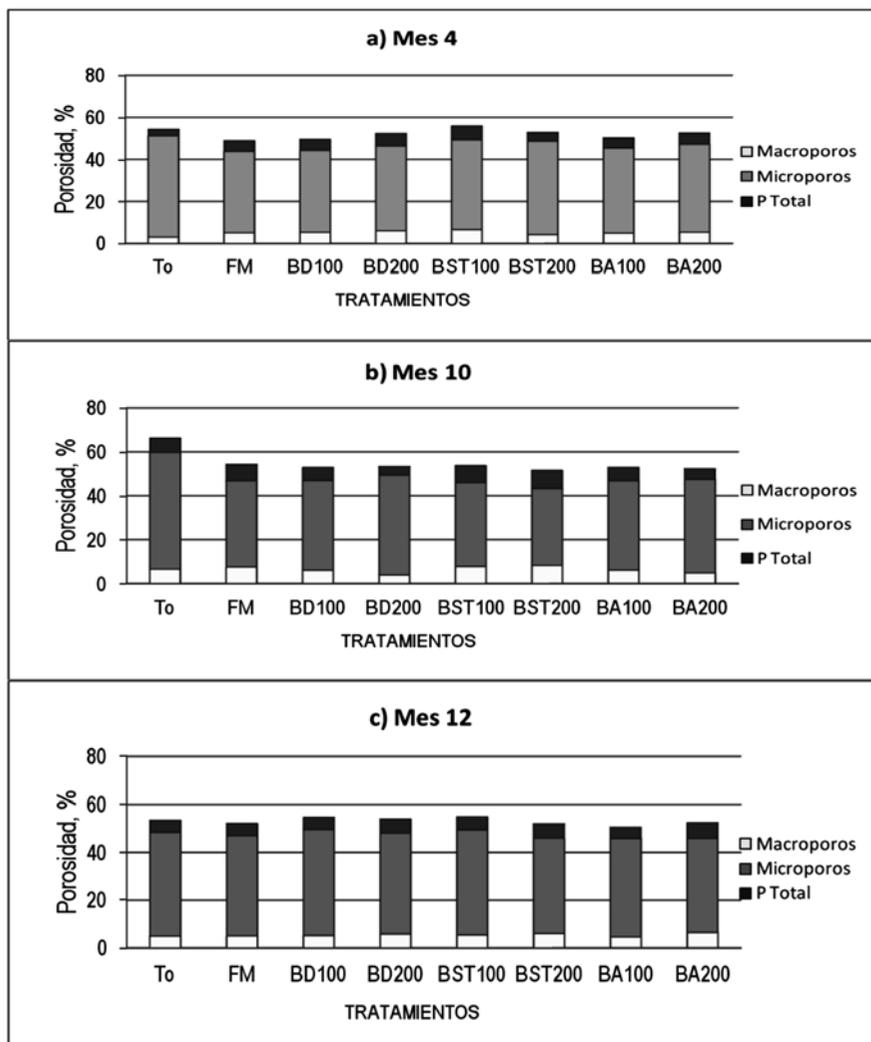


Figura 1. Comportamiento de la porosidad del suelo en cada periodo de muestreo y tratamiento.

Para los tratamientos con biosólidos, los valores de PT fueron similares, siendo BST100 el que mayor valor presentó para todos los periodos de muestreo, en concordancia con la DA. Los valores de PT más bajos ocurrieron con BD100, BST200 y BA100 a los 4, 10 y 12 m.d.s., respectivamente. Los valores de BD y los de BA no mostraron diferencias en la PT del suelo al variar las dosis de aplicación para los periodos de muestreo; mientras que en el caso del BST, la menor dosis favoreció los mayores valores de PT para todos los tiempos de muestreo. En el caso de la fertilización mineral (FM), la PT fue menor que la observada con los biosólidos 4 m.d.s., no obstante, a los 10 m.d.s. presentó los valores más altos, coincidiendo con los valores de

DA encontrados. Lo anterior demuestra que la aplicación de M.O. mejora las propiedades físicas, incluyendo la porosidad, y favorece la agregación del suelo (Six *et al.*, 2004).

Los valores de macroporosidad (MP) encontrados fueron menores que 10% con coeficientes de variación > 25% debido, probablemente, a la alta variabilidad espacial del suelo en estudio y a errores de muestreo. Según Jaramillo (2002) los valores de MP deben ser aproximadamente de 25%; valores por debajo de 10% podrían indicar fenómenos de compactación del suelo, revelando limitaciones para el drenaje del agua de exceso y la aireación del cultivo. El tratamiento testigo presentó los menores valores de MP a los 4 m.d.s., seguido por el fertilizante mineral

y por los tratamientos con biosólidos, siendo BD100 y BD200 los que mostraron los mayores valores para todos los periodos de muestreo.

Lo anterior indica que la adición de materiales orgánicos en las primeras etapas probablemente favoreció la formación de agregados grandes (macroestructura) lo que determinó la MP en este suelo con propiedades vérticas, que ayuda a generar condiciones más adecuadas para la germinación y crecimiento de plantas. No obstante, en los otros dos periodos de muestreo los tratamientos BD100, BD200, BA100 y BA200 redujeron la MP en el suelo, evidenciando posibles fenómenos de dispersión de arcillas por la adición al suelo de elementos dispersantes como Na^+ y Mg^{+2} contenidos en los biosólidos, como lo demostraron Filizola *et al.* (2008). En los tratamientos BA100 y BA200 es posible que inicialmente se haya presentado la precipitación del carbonato de calcio alrededor de los poros, indicando procesos de cementación tal como lo demostraron Glab y Gondek (2008).

Los valores de MIP encontrados variaron entre 43% y 60% en todos los periodos de muestreo, sin diferencias significativas ($P > 0.05$) entre tratamientos, con coeficientes de variación menores que 20%, lo que indica la alta capacidad de retención de humedad que

poseen estos suelos. Al igual que la MP, los valores óptimos de MIP se hallan alrededor de 25% y valores por encima indican alta retención de humedad y baja aireación (Jaramillo, 2002).

En el tratamiento testigo, durante todos los periodos de muestreo, se observaron los mayores valores de MIP; mientras que la adición de los biosólidos contribuyó a la disminución de dichos valores, lo que mejora las condiciones de aireación y drenaje en el suelo, siendo los tratamientos BST100 y BST200 los de menores valores. En los tratamientos con biosólidos, el BST100 presentó los más altos valores a los 4 m.d.s; mientras que el BD200 los presentó a los 10 m.d.s. Sin embargo, a los 12 m.d.s., una vez mineralizada gran parte de la M.O. aplicada, los valores de MIP para todos los tratamientos fueron similares entre ellos y con el testigo y el fertilizante mineral. Al comparar las dosis empleadas, los BD y BA, mostraron que al aumentar la dosis aumenta la MIP, contrario a lo que ocurre con los BST donde con la dosis más baja se obtuvo el mayor valor.

Los resultados de la variación de los valores del diámetro ponderado medio (DPM), como una medida de estabilidad estructural (Cuadro 5), permiten calificar este suelo como moderadamente estable (IGAC, 2006b). No

Cuadro 5. Efecto de la aplicación de biosólidos sobre la estabilidad estructural del suelo como promedio ponderado del diámetro de partícula, por tratamiento

Tratamientos	Tiempo desde la siembra (meses)					
	4		10		12	
	Prom. (mm)	C.V. (%)	Prom. (mm)	C.V. (%)	Prom. (mm)	C.V. (%)
To	1.62	15.0	2.30	33.5	3.21	7.2
FM	1.64	20.1	2.81	19.3	2.58	23.2
BD100	1.79	22.3	2.37	29.1	2.99	18.9
BD200	2.04	21.5	2.93	12.5	3.12	12.9
BST100	1.94	23.2	2.42	37.3	3.42	25.7
BST200	2.16	25.2	2.45	22.5	3.25	13.8
BA100	2.47	27.7	2.84	20.0	2.97	20.4
BA200	1.82	30.7	3.01	17.5	3.24	9.6
F value	1.875		1.307		1.345	
p value	0.100		0.273		0.256	
g.l.	7		7		7	

C.V. coeficiente de variación.

se encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre tratamientos; sin embargo, los menores valores de DPM se presentaron para el tratamiento To y FM en comparación con los tratamientos con biosólidos para todos los periodos de muestreo, destacando el papel de la M.O. en la formación y aumento del tamaño de los agregados.

Entre los tratamientos con biosólidos, BA100 y BA200 sobresalen como los que mayores DPM presentaron, mostrando el poder floculante y estabilizante del calcio. Las mayores dosis de biosólidos formaron agregados más grandes, mostrando una relación directa entre aplicación de M.O. y DPM similar a lo hallado por Six *et al.* (2004).

En general, la aplicación de biosólidos no tuvo un efecto significativo sobre las propiedades físicas del suelo estudiado, cuyas características no permitieron cambios estructurales con las tasas de aplicación realizadas en el ciclo del cultivo; sin embargo, dicha aplicación mostró una tendencia a disminuir la DA, aumentar la MP y el DPM, mejorando las condiciones físicas del suelo, siendo el tratamiento con biosólido tratado térmicamente con el 100% de la dosis de nitrógeno el que mostró mejor comportamiento.

Rendimiento del cultivo

En la Figura 2 aparecen los rendimientos obtenidos con los diferentes tratamientos ($F = 2.2447$, $P > 0.05$ -ns y 7 gl), siendo similares a los hallados por Chiba *et al.* (2008). Los

rendimientos variaron entre 49.5 y 85.6 t/ha de caña, resultados que estuvieron por debajo del promedio en la zona del Valle del Cauca en el periodo 2010 - 2011 que fueron de 114.6 y 122 t/ha de caña, respectivamente (Cenicaña, 2011). Estos bajos rendimientos se debieron posiblemente a la alta precipitación en la época, por la presencia del fenómeno de La Niña, sumado a las prácticas culturales empleadas como la localización de la semilla en el fondo del surco y no en el lomo (Ramírez, 2012) y a las características propias del suelo y de la variedad (Victoria *et al.*, 2012).

El mayor rendimiento se alcanzó con la fertilización mineral versus los demás tratamientos, lo cual indica que la fertilización convencional inorgánica suple los requerimientos nutricionales del cultivo (NPK) y que la sola aplicación de abonos orgánicos no es suficiente. Los tratamientos BA100 y BA200 fueron los de más bajos rendimientos, inclusive por debajo del testigo, debido probablemente a que, además de los factores anteriormente mencionados, el pH del suelo en estudio es moderadamente alcalino y al adicionarle materiales con alto pH puede disminuir la disponibilidad de elementos esenciales, entre ellos fósforo y los micronutrientes Fe, Cu y Zn. Además, la adición excesiva de Ca puede crear desbalances entre cationes y limitar la absorción de Mg e inclusive de K (Estrada, 2001).

Entre los tratamientos con biosólidos, el BD200 fue el de mayor producción, siendo

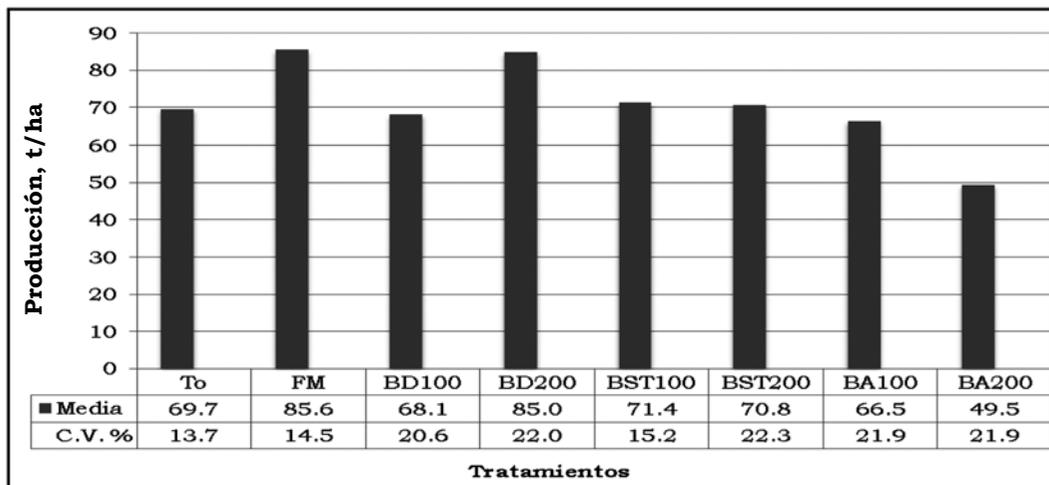


Figura 2. Efecto de la aplicación de biosólidos sobre el rendimiento del cultivo de caña de azúcar.

ésta similar a la obtenida con la aplicación de FM. Cuando se aplicaron BD, los mayores rendimientos se alcanzaron con las mayores dosis de este tratamiento; mientras que con BST y BA, la respuesta fue inversa, o sea, a menor dosis mayor rendimiento, lo que coincidió con las mejores condiciones físicas del suelo.

Conclusiones

- La aplicación de biosólidos no produjo diferencias significativas en las propiedades físicas del suelo evaluadas ni en el rendimiento del cultivo; no obstante, se observó una tendencia a aumentar la macroporosidad y la estabilidad estructural y disminuir la densidad aparente y la microporosidad en el suelo, con respecto a los tratamientos testigo y con fertilización mineral.
- El mayor rendimiento se consiguió con la fertilización mineral, lo cual demuestra que la productividad del cultivo de caña depende, entre otros factores, de la fertilidad integral del suelo que incluye, no sólo la adecuación del medio físico, sino también un aporte de nutrientes suficiente y adecuado.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias y a la Universidad del Valle por su apoyo financiero en el proyecto código 1106-489-25147, así mismo agradecen a las Empresas Municipales de Cali- EMCALI EICE ESP por permitir realizar la investigación en las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo-PTAR-C.

Referencias

Barbosa, M. C.; Tavares Filho, J.; e Fonseca, I. C. 2007. Efeito do lodo de esgoto em propriedades físicas de um Latossolo Vermelho eutroférico. *Sem. Ciên. Agr.* 28:65 - 70.

Camilotti, F.; Andrioli, I.; Marques, M.; Da Silva, A.; Tasso, L.; y De Nobile, F. 2006. Atributos físicos de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar após aplicações de lodo de esgoto e vinhaça. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal* 26(3):738 - 747.

Carbonell, J. 2010. Variabilidad espacial de la producción de caña de azúcar en el valle del río Cau-

ca. Características físicas y químicas de los suelos y equipos de aplicación variable de fertilizantes. En: *Memorias Curso de Nutrición y Fertilización de la Caña de Azúcar. Tecnicaña - Asociación de Técnicos Cultivadores de Caña, Cali.* p. 197 - 207.

Castro, H. y Gómez, M. 2010. Fertilidad de suelos y Fertilizantes. En: *Burbano, H y Mojica, F (eds.). Ciencia del Suelo. Principios básicos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Colombia.* p. 213 - 303.

Cenicaña (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia). 2011. Informe anual 2010. Cali. 105 p.

Chiba, M. K.; Mattiazzo, M. E.; y Oliveira, F. C. 2008. Cultivo de cana-de-açúcar em Argissolo tratado como lodo de esgoto. I: Disponibilidade de nitrogênio no solo e componentes de produção. *Rev. Bras. Ciên. Solo.* 32(2):532 - 643.

Civeira, G. y Lavado, R. 2006. Efecto del aporte de enmiendas orgánicas sobre propiedades físicas e hidrológicas de un suelo urbano degradado. *Argentina. CI. Suelo* 24(2):123 - 130.

Comisión Europea. Sewage sludge. European Commission, Brussels. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/index.htm> 2010.

Dornelas, M.; Vieira, M.; Araújo, L.; Pires, A. e Ferreira, H. 2011. Atributos físicos e químicos de área degradada tratada com lodo de esgoto. *Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, Novembro. Circ. Tec. No. 21.*

Estrada, G. 2001. Disponibilidad de calcio, magnesio y azufre. Su análisis en suelos y plantas y su interpretación. En: *F. Silva (ed.). Los elementos secundarios (Ca, Mg, S) y el silicio en la Agricultura. Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo, Bogotá,* p. 85 - 104.

Filizola, H. F.; De Souza, M. D.; Fereira, M.A. y Boeria, C. R. 2008. Aspectos físicos de um solo tratado com lodo de esgoto. Estabilidade de agregados e argila dispersa em agua. Em: *Bettiol, W y Camargo, O.(eds.). Lodo de esgoto impactos ambientais na agricultura. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria -Embrapra. 2ª. Edición.* 349 p.

Glab, T y Gondek, K. 2008. Effect of organic amendmets on morphometric properties of macropores in stagnic gleysol soil. *Pol. J. environ. Stud.*17(2):209 - 214.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2006a. Estudio detallado de suelos y capacidad de uso de las tierras sembradas con caña de azúcar localizadas en el valle geográfico del río Cauca. CD-ROM

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2006b. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Sexta

- Edición. Bogotá. Imprenta Nacional de Colombia. 674 p.
- Jaramillo, D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias. 613 p.
- Macedo, J. R.; Souza, M. D.; Reichardt, K.; y Bacchi, O. S. 2006. Atributos físicos e hídricos em solo tratado com lodo de esgoto. En: Bettiol, W. y Camargo, O. A (Eds.). Lodo de esgoto-impacto ambiental do uso agrícola. Jaguariúna, Embrapa Meio Ambiente. p. 193 - 205.
- Melo, V. P.; Beutler, A. N.; Souza, Z. M.; Centurion, J. F. e Melo, W. J. 2004. Atributos físicos de Latossolos adubados durante cinco anos com biossólido. Pesqu. Agropecu. Bras. 39:67 - 72.
- Ojeda, G.; Alcañiz J. M.; y Le Bissonnais, Y. 2008. Differences in aggregate stability due to various sewage sludge treatments on a mediterranean calcareous soil. Ecosys Environ, 125:48 - 56.
- Pinzón, A. 2009. Apuntes sobre física de suelos. Cargraphics S.A. Bogotá. 44 - 46 p.
- Pla, I. 2010. Medición y evaluación de propiedades físicas de los suelos. Dificultades y errores más frecuentes. I-Propiedades mecánicas. Suelos Ecuatoriales 40 (2):75 - 93.
- Potisek, M.; Figueroa, U.; González, G.; Jasso, R. y Orona, I. 2010. Aplicación de biosólidos al suelo y su efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrimentos. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C Terra Latinoamericana 28(4):327 - 333.
- Ramírez, C. 2012. Estudio de algunos factores que afectan la germinación de la caña de azúcar. Tesis de grado Ingeniería Agrícola Universidad del Valle. Cali, Colombia. 106 p.
- Ramírez, R. y Pérez, M. 2006. Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo (*Raphanus sativus* L.). Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín. 59 (2):3543-3556.
- Silva, J. A.; Torres, P.; y Cardoza, Y. 2013. Thermal drying and alkaline treatment of biosolids: Effects on nitrogen mineralization. Clean Soil, Air, Water 41(3):298 - 303.
- Six, J.; Bossuyt, H.; Degryze, S.; e Deneff, K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil Tillage Res. 79:7 - 31.
- Torrente, A. 2007. Importancia de las propiedades físicas del suelo en el uso eficiente del agua en la agricultura de alto rendimiento. Suelos Ecuatoriales 37(1):15 - 23.
- Torres, P.; Silva, J.; y Escobar, J. C. 2007. Aplicación agrícola de lodos compostados de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Livest. Article #184. Retrieved September 19, 2012, Res. Rur. Develop. 19(12). From <http://www.lrrd.org/lrrd19/12/torr19184.htm>
- Tsadilas, C.; Mitsios, I.; y Golia, E. 2005. Influence of biosolids application on some soil physical properties. Soil Sci. Plant. Anal. 36:709 - 716.
- Uribe, M. H.; Chavez, N. y Orozco, G. 2003. Uso de biosólidos como fertilizantes en cultivos forrajeros y algodón. En: Salazar, E.; Fortis, M.; Vazquez, A. A.; y Vazquez, V. C. (eds.). Agricultura orgánica. Facultad de Agricultura y Zootecnia de UJED Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. 271 p.
- USDA (United State Department of Agriculture) . 2011. Natural resources conservation service. National Agronomy Manual. 4th. Ed. 190-V-NAM.
- Victoria, J.; Amaya, A.; Rangel, H.; Viveros, C.; Cassalet, C., et al. 2002. Características agronómicas y de productividad de la variedad Cenicaña Colombia (CC) 8592. Cenicaña - Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. Serie Técnica no. 30. 79 p.
- WEF - Water Environment Federation. 1998. Biosolids Composting. Special Publication. EE.UU. 187 p.