

APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS AL SUELO Y SU EFECTO SOBRE CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIMENTOS

Soil Applied Biosolids and its Effect on Soil Organic Matter and Nutrient Content

María del Carmen Potisek-Talavera^{1‡}, Uriel Figueroa-Viramontes^{2†}, Guillermo González-Cervantes¹
Rodolfo Jasso-Ibarra³ e Ignacio Orona-Castillo⁴

RESUMEN

El crecimiento de la población y las exigencias de agua potable hace que los volúmenes de aguas residuales se incrementen, las cuales al ser tratadas generan un alto volumen de lodos residuales. Los altos costos para la disposición final de los biosólidos, hace que una alternativa para disposición sea la utilización como mejorador del suelo o fertilizante orgánico. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el contenido de materia orgánica, macro y micronutrientes en el suelo, después de la aplicación de biosólidos, así como su distribución en el perfil del suelo. El estudio se llevó a cabo en columnas de PVC empacadas con suelo de textura franco-arcillo-limoso. Los tratamientos fueron dosis de biosólidos (100 y 200 Mg ha⁻¹), 100 kg N ha⁻¹ como sulfato de amonio y un testigo sin fertilizar. La aplicación de biosólidos incrementó la materia orgánica en el estrato superficial del suelo. No se observaron tendencias significativas en la distribución de la materia orgánica en el perfil del suelo; en promedio de todo el perfil, los valores más altos se observaron en la dosis alta de biosólidos (1.2%), mientras que el valor más bajo fue 1.1% en el testigo. Los biosólidos incrementaron la concentración de nitratos y fósforo aprovechable en el suelo hasta una profundidad de 35 cm, en tanto que el potasio no aumentó significativamente. La aplicación de biosólidos incrementó la concentración de

micronutrientes en todo el perfil de suelo; el orden de acumulación en el suelo con biosólidos fue Zn > Fe > Mn > Cu. El uso de biosólidos en suelos agrícolas, forestales y pastizales puede ser una alternativa de disposición final, además de una opción para aportar nutrientes a los cultivos, lo que permitiría reducir costos de producción.

Palabras clave: columnas de suelo, nitrógeno, fósforo, elementos menores.

SUMMARY

Population growth and water demand increase volumes of wastewater, which when treated generates high volumes of sewage sludge. The high costs of disposal of sewage sludge biosolids makes their use as an amendment or organic fertilizer an alternative. The objective of the present research was to evaluate the content of organic matter, macro and micronutrients in the soil after incorporating biosolids and their distribution in the soil profile. The study was carried out in PVC columns packed with silty clay loam soil. Treatments were rates of biosolids (100 and 200 Mg ha⁻¹), 100 kg N ha⁻¹ as ammonium sulfate and a control treatment without fertilizer. Biosolids increased organic matter in the surface layer of the soil. There were no significant trends in the distribution of organic matter in the soil profile; on average in the entire profile, highest values were observed in the treatment with a high rate of biosolids (1.2%), while the lowest value was 1.1% in the control. Biosolids increased nitrate and available phosphorous in the soil up to a depth of 35 cm, and potassium did not significantly increase. Applied biosolids increased the micronutrient content in the entire soil profile; the order of micronutrient concentration in the soil with biosolids was Zn > Fe > Mn > Cu. Biosolids used in agricultural, forest and range soils might be an alternative for their final disposal; furthermore, biosolids might be a choice to deliver nutrients to crops, reducing production costs.

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. 35140 Gómez Palacio, Durango, México.

[‡] Autor responsable (potisek.carmen@inifap.gob.mx)

² INIFAP-Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coahuila, México.

[†] Autor para correspondencia (figueroa.uriel@inifap.gob.mx)

³ INIFAP - Campo Experimental Delicias. Delicias, Chih., México.

⁴ Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia. 35110 Gómez Palacio, Durango, México.

Index words: soil columns, nitrogen, phosphorous, micronutrients

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial el crecimiento demográfico y las exigencias de agua para uso doméstico e industrial hacen que los volúmenes de aguas negras se incrementen. En México, de acuerdo a la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental, las ciudades con más de 50 000 habitantes, deben cumplir con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 (SEMARNAT, 1996), la cual establece los límites permisibles de contaminantes en el agua residual al ser vertida en cuerpos de agua y bienes nacionales. Hasta el año 2005, en México se tenían 1433 plantas tratadoras de agua residual (PTAR), con un gasto instalado de 95 774 L s⁻¹ y una generación estimada de lodos residuales de aproximadamente 190 000 Mg año⁻¹ (CNA, 2005). El método convencional de disposición final de estos lodos es el confinamiento en rellenos sanitarios, sin embargo, al concentrar grandes volúmenes de lodos en los rellenos sanitarios se corre el riesgo de lixiviación de algunos contaminantes como nitratos, compuestos orgánicos y metales pesados que pueden llegar hasta el acuífero (Gove *et al.*, 2001; Figueroa *et al.*, 2008).

La utilización de los lodos residuales PTAR está regulado por la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2002), que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Al cumplir con dichas normas, los lodos residuales se consideran biosólidos y pueden ser aprovechados como abonos orgánicos en suelos agrícolas forestales y pastizales, como una alternativa de disposición final (Jurado *et al.*, 2004).

Los biosólidos contienen un valor nutrimental que mejora la fertilidad de los suelos y la producción de los cultivos (Kara *et al.*, 2003); son ricos en materia orgánica (60 a 70%) y nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, como el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Una tonelada de biosólidos puede contener de 37 a 50 kg de N y de 13 a 24 kg de P (Stehower, 2000). Lo anterior permite disminuir el uso de los fertilizantes comerciales, ya que en la actualidad el costo de los mismos es muy elevado. Con la aplicación de biosólidos en parcelas comerciales, Shober *et al.* (2003), encontraron que las diferencias en materia orgánica (MO) en el suelo con biosólidos y testigo no

fueron significativas, con valores de 3.67 y 3.72% (2.16 y 2.13% de C orgánico) respectivamente; los autores discuten que una posible razón es una acelerada mineralización por una población microbiana estimulada. La concentración de N y P disponible fue mayor donde se aplicó biosólido, mientras que el K disponible fue menor donde se aplicó. Por otro lado Roberts *et al.* (1988) comentan que la aportación de N por los biosólidos disminuye con el tiempo y entonces se requiere suministrar fertilizante nitrogenado para mantener el crecimiento de los cultivos. Otro beneficio de los biosólidos es que libera lentamente los nutrientes, los cuales permanecen disponibles para la planta durante el ciclo del cultivo (Henry *et al.*, 1999; Cogger *et al.*, 2004). La disponibilidad del N está en función de las condiciones climáticas y de la cantidad de biosólido aplicado y de su relación C/N (Pescod, 1992; Gilmour y Skinner, 1999). Los suelos mejorados con biosólidos tienden a tener un pH neutro y con alta concentración de MO y P (Mohammad y Athamneh, 2004). Considerando los antecedentes anteriores, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la concentración de materia orgánica, macro y micronutrientes en el suelo, después de la aplicación de biosólidos, así como su distribución en el perfil del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo un experimento en columnas empacadas con suelo de estructura alterada, en el laboratorio de suelos del Centro Nacional de Investigación en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del INIFAP (CENID-RASPA), ubicado en Gómez Palacio, Durango, durante el periodo 2004-2005. Algunas propiedades físicas y químicas del suelo utilizado se anotan en el Cuadro 1. Los métodos de análisis se realizaron de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000).

Los biosólidos empleados fueron obtenidos del proceso de tratamiento de aguas residuales de la planta tratadora perteneciente al club Campestre La Rosita, ubicada en la ciudad de Torreón Coah. El tratamiento que reciben los biosólidos en la planta tratadora es digestión aeróbica, seguida de disposición en camas de secado. La composición nutrimental de los biosólidos se evaluó en el laboratorio de suelos del CENID-RASPA y los resultados se anotan en el Cuadro 2.

El agua utilizada para la aplicación de riego al suelo en las columnas presentó un pH de 7.35, una

Cuadro 1. Características físicas y químicas del suelo utilizado en el empaque de las columnas.

Parámetro	Unidad	Valor
pH		8.07
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	1.34
Materia orgánica	%	0.79
Nitrógeno total	%	0.05
Nitratos	mg kg ⁻¹	25.5
Fósforo disponible	mg kg ⁻¹	10.5
Potasio disponible	mg kg ⁻¹	671
Porcentaje de sodio intercambiable	%	2.22
Carbonatos totales	%	7.75
Relación de adsorción de sodio	%	2.4
Arena	%	17
Limo	%	46
Arcilla	%	37
Clase textural		Franco arcillo limoso

conductividad eléctrica de 1.24 dS m⁻¹ y una relación de adsorción de sodio (RAS) de 1.25.

Para la elaboración de las columnas se utilizó tubo de PVC de 10.2 cm de diámetro y 75 cm de largo, las cuales se impregnaron de parafina en la parte interna para minimizar el flujo de agua por las paredes. El empaque de las columnas con suelo se hizo hasta una altura de 60 cm y se compactó a una densidad aparente de 1.3 g cm⁻³. En el estrato superficial (0 a 10 cm) se incorporó y se mezcló el suelo con el biosólido o el fertilizante, de acuerdo al tratamiento correspondiente. En la base de las columnas se colocó papel filtro no. 40, sostenida por malla de plástico.

Los tratamientos evaluados fueron: 1) dosis alta de biosólido (Ba), equivalente a 200 Mg ha⁻¹; 2) dosis baja de biosólido (Bb), equivalente a 100 Mg ha⁻¹; 3) sulfato de amonio ((NH₄)₂ SO₄) como fertilizante inorgánico (F), a una dosis de 100 kg N ha⁻¹; y 4) testigo (T), al cual no se le aplicó ningún fertilizante. En cada columna se simuló la aplicación de riegos de manera constante, hasta saturar la columna de suelo y drenar un volumen equivalente a la porosidad (ϵ) total en la columna ($\epsilon = 1 - \text{densidad aparente} / \text{densidad real}$; $1 - 1.3 / 2.65 = 0.51$); como el volumen ocupado por el suelo en la columna fue de 4864 cm³, el volumen drenado fue de 2481 cm³. La lámina total de agua aplicada fue de 60 cm; después de alcanzar el volumen drenado, se dejó secar el suelo en las columnas. El tiempo transcurrido del inicio del riego en las columnas al secado del suelo fue de 6 meses.

Finalmente se desempacó el suelo de las columnas, dividiéndolas en 4 estratos: 0-5, 5-10, 10-35 y 35-60 cm. En esos estratos se analizó la concentración de materia orgánica, nitrógeno disponible en forma de nitratos, P aprovechable por el método de Olsen, K disponible en acetato de amonio y micronutrientes (zinc, cobre, hierro y manganeso) disponibles en EDTA. Todos los métodos de análisis están descritos en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000).

Se analizaron los resultados de acuerdo a un diseño en bloques al azar con 3 repeticiones; se utilizó el procedimiento PROC SORT de SAS (SAS Institute, 2003) para ejecutar los análisis de varianza por separado dentro de cada profundidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Materia Orgánica

La aplicación de biosólidos incrementó ($P \leq 0.05$) la concentración de materia orgánica en el estrato superficial de suelo (0-5 cm), con valores de 0.93% en testigo a 1.44% con la dosis de 100 Mg ha⁻¹, mientras que en los estratos de 5-10 y 10-35 cm las diferencias entre tratamientos no fueron significativas (Figura 1). En el estrato de 35-60 cm fue donde se registró la menor concentración de materia orgánica, con un promedio de 1.09% (Figura 1). Los resultados anteriores coinciden con lo mencionado por Stehouwer *et al.*, (2000), referente al incremento de la materia orgánica del suelo al aplicar biosólidos. El incremento en la materia orgánica con la aplicación de biosólidos fue menor que lo reportado por Ozores-Hampton *et al.* (2005), quienes observaron valores hasta 2.8%. Una posible razón de

Cuadro 2. Composición química de los biosólidos utilizados en el presente estudio.

Característica/propiedad	Unidad	Valor
pH		7.07
Conductividad eléctrica	dS m ⁻¹	5.68
Materia orgánica	%	23
Cationes solubles	meq L ⁻¹	49.4
Nitrógeno total	%	1.74
Nitratos	mg kg ⁻¹	245
Fósforo disponible	mg kg ⁻¹	715
Potasio disponible	mg kg ⁻¹	931
Relación de adsorción de sodio	%	4.44

los valores bajos en el presente estudio es la lixiviación de materia orgánica disuelta; Wu y Ma (2001) encontraron valores de materia orgánica disuelta hasta de 38.6% en compostas a base de biosólidos. Además, se ha demostrado que la lixiviación de materia orgánica disuelta puede mover consigo nitrógeno orgánico (Van Kessel *et al.*, 2009) y metales pesados (Zhou y Wong, 2001; Ashworth y Alloway, 2008). La concentración de materia orgánica en la dosis alta de biosólido no tuvo relación con la profundidad (Figura 1), aunque las diferencias de un estrato a otro no fueron muy diferentes (de 1 a 1.4%); lo anterior pudo deberse a un reacomodo de la alta dosis aplicada en el estrato de 0-10 cm de profundidad (200 Mg ha⁻¹).

Macronutrientos

La aplicación biosólidos y fertilizante incrementó ($P \leq 0.05$) la concentración de N-NO₃⁻ en el estrato de 0-5 cm, con respecto al tratamiento testigo (Cuadro 3). En el estrato de 0-5 cm el valor más alto de N-NO₃⁻

ocurrió en la dosis baja de biosólidos, con 620 mg kg⁻¹ seguido del tratamiento con fertilizante y la dosis alta de biosólidos, los cuales fueron estadísticamente superiores al testigo. En los estratos de 5-10 y 10-35 cm, la dosis alta de biosólidos tuvo valores mayores ($P \leq 0.05$) con respecto a los demás tratamientos (Cuadro 3). En general, la concentración de N-NO₃⁻ disminuyó al aumentar la profundidad. La menor concentración de N-NO₃⁻ a 0-5 cm de profundidad, en la dosis alta de biosólidos, se debe a que se movió y se acumuló en los estratos de 5-10 y 10-35 cm de profundidad; al sumar la concentración de N-NO₃⁻ en los estratos analizados, el orden fue: dosis alta > dosis baja > fertilizante > testigo (Cuadro 3). Los valores de N-NO₃⁻ en los estratos superiores del suelo son altos porque no hay un cultivo establecido que remueva el N mineralizado. Cogger *et al.* (2001) encontraron que la recuperación aparente de N por pasto "tall fescue" (*Festuca arundinacea* L.) alcanzó valores alrededor del 50% del N total incorporado en biosólidos, lo cual es un indicador de la tasa de mineralización de este abono orgánico.

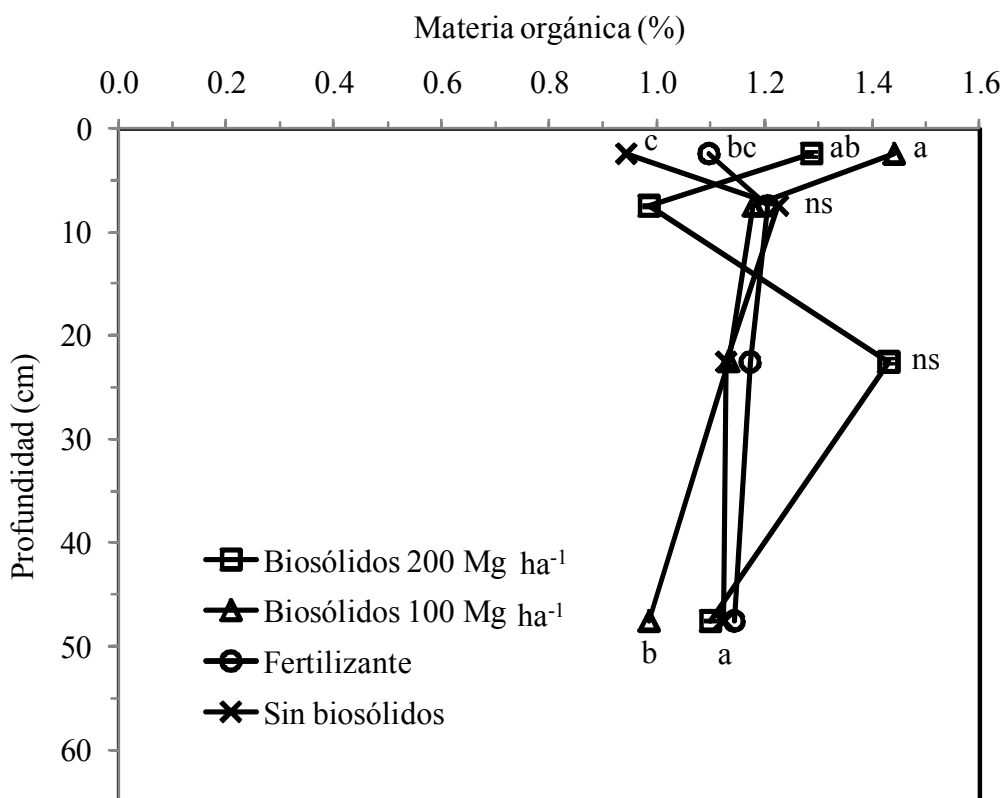


Figura 1. Distribución de la materia orgánica en el perfil de las columnas de suelo con adición de biosólidos o fertilizante. Las marcas indican la profundidad media de cada estrato. Letras distintas dentro de cada estrato indican diferencia significativa (Tukey, 0.05).

Cuadro 3. Concentración de nitrógeno, fósforo y potasio a diferentes estratos de columnas empacadas de suelo, con diferentes tratamientos de biosólidos y fertilizante.

Profundidad cm	Biosólidos		Sulfato de amonio	Testigo
	200 Mg ha ⁻¹	100 Mg ha ⁻¹	100 kg ha ⁻¹	
Nitratos (mg kg ⁻¹)				
0-5	400.9 ab	620.0 a	587.8 a	54.8 c
5-10	258.5 a	75.0 b	22.3 c	5.8 c
10-35	74.0 a	15.5 b	6.5 b	3.0 b
35-60	5.8 b	4.3 b	10.0 a	5.0 b
Total	739.2	714.8	626.6	68.6
Fósforo (mg kg ⁻¹)				
0-5	162.0 a	107.0 b	9.0 c	10.0 c
5-10	200.0 a	155.0 b	11.0 c	8.0 c
10-35	35.0 a	24.0 b	11.0 c	11.0 c
35-60	8.0 b	10.0 a	11.0 a	8.0 b
Total	405	296	42	37
Potasio (mg kg ⁻¹)				
0-5	988 a	1108 a	1055 a	1083 a
5-10	1223 a	1130 a	1168 a	1130 a
10-35	2055 a	1295 a	1270 a	1640 a
35-60	1345 a	1280 a	1293 a	1328 a
Total	5611	4813	4786	5181

Letras distintas en hileras indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey, 0.05).

Respecto al P disponible, al aplicar el biosólido en dosis alta, éste mostró un aumento estadísticamente significativo ($P \leq 0.05$) con respecto a la dosis baja y a los demás tratamientos, en los 3 estratos superiores. El valor más alto se registró en el estrato de 5-10 cm, con 200 mg kg⁻¹; (Cuadro 3). Como la misma tendencia se observó en la dosis baja, esto indica cierta movilización de P del estrato de 0-5 cm; la movilidad de P reactivo disuelto ha sido reportada en estudios previos con aplicación de estiércol (McDowell y Sharpley, 2001; Brock *et al.*, 2004). Aunque en general no se reporta la lixiviación de P como un problema de contaminación, algo de P soluble puede moverse en los macroporos del suelo (Butler *et al.*, 2007). Como no se aplicó fertilizante fosforado, los valores de P en los tratamientos con fertilizante y testigo fueron similares.

La concentración de K en el suelo no se vio afectada ($P \leq 0.05$) por la aplicación de los tratamientos; los valores fluctuaron de 988 a 2055 mg kg⁻¹. El K mostró tendencia a incrementar con la profundidad, con el valor más alto de 2055 mg kg⁻¹ de 10-35 cm del suelo con dosis alta de biosólidos, seguido por el valor de

1640 mg kg⁻¹ en el mismo estrato del suelo testigo (Cuadro 3). Este comportamiento es debido a que los biosólidos normalmente son bajos en K, porque la mayor parte permanece en forma soluble en el agua tratada (Jacobs y McCreary, 2001). Además, el K es fácilmente lixiviado y acumulado a mayores profundidades del suelo; resultados similares con respecto al efecto en macronutrientos fueron encontrados por Ozores-Hampton *et al.* (2005).

Micronutrientos

En el Cuadro 4 se muestran la concentración de micronutrientos aprovechables (extraídos en EDTA) en función de los tratamientos aplicados y la profundidad del suelo. Se observó que la aplicación de biosólidos en dosis alta incrementó ($P \leq 0.05$) el contenido de micronutrientos en todo el perfil de suelo. El orden de contenido de micronutrientos en el suelo con dosis alta de biosólidos fue Zn > Fe > Mn > Cu, con valores

Cuadro 4. Concentración de hierro, cobre, zinc y manganeso a diferentes estratos de columnas empacadas de suelo, con diferentes tratamientos de biosólidos y fertilizante.

Profundidad cm	Biosólidos		Sulfato de amonio	Testigo
	200 Mg ha ⁻¹	100 Mg ha ⁻¹	100 kg ha ⁻¹	
Hierro (mg kg ⁻¹)				
0-5	11.33 a	8.98 a	1.36 b	1.04 b
5-10	13.34 a	12.82 a	2.23 b	2.37 b
10-35	12.65 a	9.45 b	3.55 c	3.02 c
35-60	11.97 a	4.65 b	3.32 b	2.77 b
Cobre (mg kg ⁻¹)				
0-5	10.66 a	6.53 b	2.44 c	1.84 c
5-10	9.88 a	8.00 a	2.60 b	2.00 b
10-35	4.18 a	3.26 ab	2.40 b	2.46 b
35-60	3.77 a	3.35 b	1.96 c	2.69 d
Zinc (mg kg ⁻¹)				
0-5	126.60 a	66.82 b	3.95 c	2.92 c
5-10	100.10 a	50.85 b	2.26 c	2.59 c
10-35	13.21 a	6.68 b	3.74 c	2.82 c
35-60	4.81 a	4.22 ab	3.67 bc	3.20 c
Manganeso (mg kg ⁻¹)				
0-5	11.24 a	9.78 a	5.07 b	5.17 b
5-10	11.65 a	6.18 b	4.62 b	4.37 b
10-35	5.94 a	3.75 b	5.00 c	4.03 c
35-60	4.65 ns	4.27	4.28	4.53

Letras distintas en hileras indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey, 0.05).

promedio en el perfil de 61.2, 12.3, 8.4 y 7.1 mg kg⁻¹, los cuales corresponden a valores muy alto, moderadamente alto, medio y muy alto, respectivamente (Castellanos *et al.*, 2000); en el mismo orden, los valores en el suelo testigo fueron 2.9, 2.3, 4.5 y 2.3 mg kg⁻¹ (Cuadro 4). En el caso de la dosis baja, también incrementó, aunque en menor medida, el contenido de micronutrientes, sobre todo en los tres primeros estratos. Las diferencias entre el suelo con fertilizante y el testigo no fueron significativas. En el presente estudio, los suelos tratados con biosólidos registraron las mayores concentraciones de Cu, Zn y Mn en los estratos 0-10 cm, mientras que la concentración de Fe en los estratos analizados fue menos constante (Cuadro 4). Sukkariyah *et al.* (2005), mostraron que metales como cobre (Cu) y zinc (Zn) tienden a concentrarse en el estrato superior (0-20 cm), mientras que el subsuelo se ve poco afectado, a pesar de 17 años de aplicar biosólidos.

CONCLUSIONES

La aplicación de biosólidos incrementó la materia orgánica en el estrato superficial del suelo. No se observaron tendencias significativas en la distribución de la materia orgánica en el perfil del suelo. Los biosólidos incrementaron el contenido de nitratos y fósforo aprovechable en el suelo hasta una profundidad de 35 cm, mientras que el potasio no aumentó significativamente con la aplicación de biosólidos. La concentración de micronutrientes se incrementó en todo el perfil de suelo con la aplicación de biosólidos; el orden de micronutrientes en el suelo con biosólidos fue Zn > Fe > Mn > Cu. El uso de biosólidos en suelos agrícolas, forestales y pastizales puede ser una alternativa de disposición final y una opción para aportar nutrientes a los cultivos, observando siempre la normatividad vigente (NOM-004-SEMARNAT-2002) para minimizar riesgos de contaminación lo que permitiría reducir costos de producción.

LITERATURA CITADA

- Ashworth, D. J. and B. J. Alloway. 2008. Influence of dissolved organic matter on the solubility of heavy metals in sewage-sludge-amended soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 39: 538-550.
- Brock, E. H., Q. M. Ketterings, and P. J. A. Kleinman. 2007. Phosphorus leaching through intact soil cores as influenced by type and duration of manure application. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 77: 269-281.
- Butler, S. J., J. A. Vickery, and K. Norris. 2007. Farmland biodiversity and the footprint of agriculture *Science. Agr. Sci.* 315: 381-383.
- Castellanos-Ramos, J. Z., J. X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar-Santelises. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelo y aguas. INCAPA, México.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2005. Inventario de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales e Industriales en la Región Lagunera. Gerencia Regional. Cuencas Centrales del Norte. Subgerencia Técnica. Jefatura de Saneamiento y Calidad del Agua. México, D. F.
- Cogger, C. G., A. I. Bary, S. C. Fransen, and D. M. Sullivan. 2001. Seven years of biosolids versus inorganic nitrogen applications to tall fescue. *J. Environ. Qual.* 30: 2188-2194.
- Cogger, C. G., A. I. Bary, and D. M. Sullivan, and E. A. Myhre. 2004. Biosolids processing effects on first- and second-year available nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 162-167.
- Figuerola-Viramontes, U., M. A. Flores-Ortiz, M. Palomo-Rodríguez, B. Corral-Díaz y J. P. Flores-Márgez. 2008. Uso de biosólidos estabilizados por digestión anaeróbica como fertilizante orgánico en algodónero. *Agrofaz* 8: 1-10.
- Gilmour, J. T. and V. Skinner. 1999. Predicting plant available nitrogen in land-applied biosolids. *J. Environ. Qual.* 28: 1122-1126.
- Gove, L., C. M. Cooke, F. A. Nicholson, and A. J. Beck. 2001. Movement of water and heavy metals (Zn, Cu, Pb and Ni) through sand and sandy loam amended with biosolids under steady-state hydrological conditions. *Bioresour. Technol.* 78: 171-179.
- Henry, Ch., D. Sullivan, R. Rynk, K. Dorsey, and C. Cogger. 1999. Managing nitrogen from biosólidos. Washington State department of Ecology, Northwest Biosolids Management Association. Bellevue, WA, USA.
- Jacobs, L. W. and D. S. McCreary. Utilizing biosolids on agricultural land. Extension bulletin E-2781. Michigan State University. Lansing, MI, USA.
- Jurado-Guerra, P., M. Luna-Luna y R. Barretero-Hernández. 2004. Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos. *Tec. Pec. Mex.* 42: 379-395.
- Kara, Y., D. Basaran, I. Kara, A. Zeitinluoglu and H. Genci. 2003. Bioaccumulation of Nickel by aquatic Macrophyta Lemna minor (Duckweed). *Inter. Agron. Biol.* 5: 281-283.
- McDowell, R. W. and A. N. Sharpley. 2001. Phosphorus losses in subsurface flow before and after manure application to intensively farmed land. *The Science of the Total Environment.* 278:113-125.
- Mohammad, M. J. and B. M. Athamneh. 2004. Changes in soil fertility and plant uptake of nutrients and heavy metals in response to sewage sludge application to calcareous soils. *Agron. J.* 3: 229-236.
- Ozores-Hampton, M., A. R. Stansly, P. McSorley, and T. A. Obreza. 2005. Effects of long-term organic amendments and soil solarization on pepper and watermelon growth, yield, and soil fertility. *Hort. Sci.* 40: 80-84.
- Pescod, M. B. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. Irrigation and drainage. FAO. Publication 47. Rome, Italy. 117.
- Roberts, J. A., W. L. Daniels, J. C. Bell, and J. A. Burger. 1988. Early stages of mine soil genesis in Southwest Virginia spoil Lithosequence. *Soil Sci. Soc. J.* 52: 716-723.
- SAS Institute. 2003. SAS/STAT user's guide. Cary, NC, USA.

- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT que establece la protección ambiental, lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento. México, D. F.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. NOM-001-Ecol-1996. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre de 1996. México, D. F.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2000. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y Análisis. México, D. F.
- Shober, A. L., R. C. Stehouwer, and K. E. Macneal. 2003. Farm assessment of biosolids effects on soil and crop tissue quality. *J. Environ. Qual.* 32: 1873-1880.
- Stehouwer, R. C., A. M. Wolf, and W. Dotty. 2000. Chemical monitoring of sewage sludge in Pennsylvania, variability and application uncertainty. *J. Environ. Qual.* 29: 1686-1695.
- Sukkariyah, B. F., G. Evanylo, L. Zelazny, and R. L. Chaney. 2005. Recovery and distribution of biosolids-derived trace metals in a clay loam soil. *J. Environ. Qual.* 34: 1843-1850.
- Van Kessel, C., T. Clough, J. W., and Van Groenigen. 2009. Dissolved organic nitrogen: an overlooked pathway of nitrogen loss from agricultural systems? *J. Environ. Qual.* 38: 393-401.
- Vandervivere, P. and P. Baveye. 1992. Saturated hydraulic conductivity reduction caused by aerobic bacteria in sand columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1-13.
- Wu, L. and L. Q. Ma. 2001. Effects of Sample Storage on Biosolids Compost Stability and Maturity Evaluation. *J. Environ. Qual.* 30: 222-228.
- Zhou, L. X. and J. W. C. Wong. 2001. Effect of dissolved organic matter from sludge and sludge compost on soil copper sorption. *J. Environ. Qual.* 30: 878-883.