

# Efecto del secado de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre (Bogotá) sobre su contenido de nutrientes, metales pesados y patógenos

## Effect of drying of biosolids from the wastewater treatment plant El Salitre (Bogotá) on the content of nutrients, heavy metals, and pathogens

Óscar Giraldo<sup>1</sup> y Amanda Lozano de Yunda<sup>2</sup>

**Resumen:** Se acondicionó el biosólido proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre, en Bogotá, para su uso agrícola o forestal, de tal manera que el producto obtenido se encontrara dentro de los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos por la estadounidense *Environmental Protection Agency* (EPA) y su contenido de nutrientes se afectara en la menor proporción posible. Se realizaron tratamientos térmicos a temperaturas de 50, 55, 60, 65 y 70 °C, y se determinó el contenido de coliformes totales, *E. coli* y *Salmonella*, el contenido de nutrientes totales (N, P, K) y metales pesados disponibles (Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn), antes y después de cada uno de los tratamientos. Los tratamientos de secado entre 55-70 °C redujeron los coliformes totales y *E. coli* hasta niveles apropiados para que el biosólido pueda ser utilizado en aplicaciones forestales. Aunque los contenidos de nutrientes del producto se redujeron entre 75% y 95%, aún se considera apropiados para su utilización como fertilizante. Los metales Cu y Zn aumentaron sus contenidos disponibles después de los tratamientos, Cd y Cr no fueron detectados y los contenidos de algunos metales pesados (Mn, Ni, Pb) se redujeron con el proceso de secado. Sin embargo, para todos los metales los valores se encontraron por debajo de los límites establecidos por la EPA para la aplicación del biosólido en terrenos agrícolas. Se concluyó que el tratamiento de secado de biosólido puede considerarse como una opción válida para su acondicionamiento para uso forestal.

**Palabras claves adicionales:** biofertilizante, tratamiento térmico, aplicación agrícola, coliformes totales, *E. coli*, *Salmonella*

**Abstract:** Biosolids from the wastewater treatment plant El Salitre (Bogotá) were conditioned for agricultural or forest use. It was expected that the product would fit within the *Environmental Protection Agency* (EPA) established maximum limits for pollution agents and maintain high level of nutrients. Thermal drying treatments at temperatures of 50, 55, 60, 65, and 70 °C were performed. Total coliform, *E. coli* and *Salmonella* content, total nutrients content (N, P, and K), and available heavy metals (Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, and Zn) were determined before and after each treatment. Drying treatments between 55-70 °C reduced total coliform and *E. coli* contents till proper forest use levels. Although nutrient content was reduced 75-95%, it is still considered as a good fertilizer. The content of available Cu and Zn increased, whereas contents of Cd and Cr were not detected, and contents of some heavy metals (Mn, Ni, and Pb) were reduced. All heavy metals contents were below EPA limits for agricultural use. In conclusion, drying treatments could be considered as a valid option to condition El Salitre wastewater sewage biosolids for their forest use.

**Additional key words:** biofertilizer, thermal treatment, agricultural use, total coliforms, *E. coli*, *Salmonella*

Fecha de recepción: 19 de julio de 2006  
Aceptado para publicación: 30 de noviembre de 2006

<sup>1</sup> Químico, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. e-mail: oskarquimico@gmail.com

<sup>2</sup> Profesora asociada, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. e-mail: alozanode@unal.edu.co

## Introducción

UNO DE LOS PRODUCTOS DE LAS PLANTAS de tratamiento de aguas residuales urbanas son los biosólidos, que contienen materia orgánica, N, P y trazas de elementos esenciales para el crecimiento de las plantas (Elliot y Dempsey, 1991). Este contenido puede ser aprovechado a nivel agrícola, siendo una alternativa ecológica y económica para su disposición. En Colombia, el interés en la aplicación de los biosólidos al suelo ha aumentado recientemente como consecuencia de la menor disponibilidad y viabilidad de otras opciones de gestión de los biosólidos, tales como el transporte a vertederos controlados, la incineración y la evacuación en el mar (Rechigl, 1995). Debido al control de polución de gases, la incineración no es viable en el largo plazo para varias comunidades. Las restricciones que se están proponiendo al transporte a vertederos pretenden excluir todo residuo orgánico de esta vía de eliminación. Potencialmente, la opción más atractiva sería esparcir los lodos en terrenos agrícolas, porque podrían reciclar nutrientes y ser útiles desde el punto de vista agronómico.

Una de las alternativas consiste en realizarles un tratamiento de secado, con el fin de reducir su volumen y eliminar los patógenos, de manera que puedan ser aprovechados desde el punto de vista agrícola, con un doble beneficio: el ambiental, al eliminarse los residuos orgánicos urbanos sin alteración relevante del equilibrio ecológico, y el agrícola, al incorporar a los suelos de cultivo la materia orgánica y los nutrientes contenidos en estos desechos.

El secado térmico es un sistema de acondicionamiento que provee al biosólido de características uniformes y sirve esencialmente para incrementar el contenido de sólidos por reducción de agua; además, destruye patógenos (organismos causantes de enfermedades), minimiza olores y reduce la atracción potencial de vectores (moscas, mosquitos y roedores) y de patógenos (*Salmonella*, *Shigella* y *Campylobacter*) (EPA, 1993). Con el secado térmico se reducen los contenidos de humedad a niveles por debajo de los conseguidos por métodos de deshidratación convencionales y los biosólidos así tratados pueden ser comercializados como abonos o acondicionadores de suelos.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del secado térmico sobre el contenido nutricional y de patógenos de los biosólidos de la Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) El Salitre, en Bogotá, de manera que se posibilite su utilización agrícola o forestal.

## Materiales y métodos

En la PTAR El Salitre se realiza un tratamiento primario del agua, removiendo 60% de sólidos suspendidos totales (SST) y 40% de materia orgánica (DBO). En la actualidad se trata un promedio de  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ , con una generación en biosólidos por digestión anaerobia de  $150 \text{ Mg} \cdot \text{día}$ , que se aprovechan como cobertura final en el relleno sanitario Doña Juana; el agua tratada se descarga de nuevo al río Bogotá.

Las muestras de biosólido se tomaron en cinco ocasiones de la banda transportadora a la salida del deshidratador, con intervalos de una semana entre septiembre y octubre de 2002. Se guardaron en bolsas de polietileno con cierre hermético, a  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 3 días antes de su uso.

### Secado del biosólido

El tratamiento térmico se les realizó en el laboratorio a muestras de unos 400 g de biosólido, en un secador directo y en bandejas dispuestas dentro de la cámara de secado (tabla 1).

**Tabla 1.** Condiciones de trabajo. Secador directo LIQ-PP, Universidad Nacional de Colombia.

Tratamiento	L1	L2	L3	L4	L5
Temperatura de salida del aire ( $^\circ\text{C}$ )	50	55	60	65	70
Temperatura de la piscina de agua ( $^\circ\text{C}$ )	24	25	26	24	28
Humedad del aire (%)	30	27	23	21	13
Temperatura de bulbo seco ( $^\circ\text{C}$ )	44	48	51	55	58
Temperatura de bulbo húmedo ( $^\circ\text{C}$ )	29	31	26	34	31

### Determinaciones de nutrientes

Se realizaron antes y después del proceso de secado con los métodos utilizados en el análisis de suelos (Olarte, 1990) y las adaptaciones a biosólidos llevadas a cabo por Leal (2002). Las muestras de biosólidos secos se pasaron por tamiz de 5 mm. Los métodos utilizados fueron: C orgánico, método de Walkley Black; N orgánico, método micro-Kjeldahl; P disponible, extracción con solución Bray II ( $\text{NH}_4\text{F}$  0,03 M,  $\text{HCl}$  0,1 M); K disponible, extracción con solución de DTPA (ácido dietilentriamino pentacético) 0,05 M,  $\text{CaCl}_2$  0,005 M y trietanolamina 0,1 M (TEA) y cuantificación por emisión atómica en un equipo Perkin Elmer Analyst 300.

### Determinación de metales pesados disponibles (Cd, Cu, Cr, Mn, Ni, Pb, Zn)

Se determinaron mediante extracción con solución de DTPA en la relación biosólido: solución extractora 1:5 (p/v) y cuantificación por absorción atómica.

## Análisis microbiológico

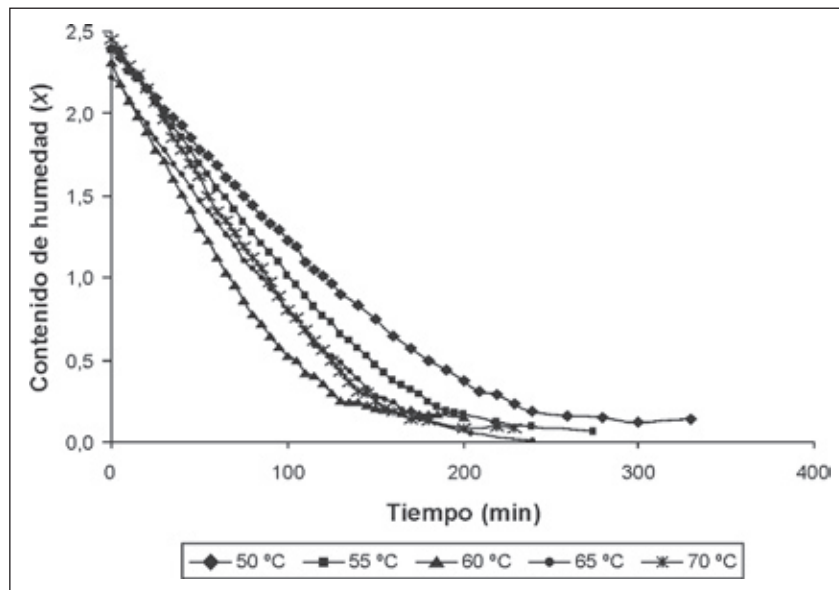
La cuantificación se realizó antes y después de cada tratamiento de secado. La determinación de coliformes totales y *E. coli* se hizo por la técnica del número más probable (NMP), utilizando como medio selectivo el sustrato Rea-dycult® coliformes. La determinación de *Salmonella* se realizó por la técnica de conteo en placa, utilizando como medio selectivo de enriquecimiento el caldo base Salmosyst®, con adición de un suplemento selectivo para *Salmonella* Salmosyst® y de siembra en medio específico agar Ram-bach®, suministrados por la empresa Merck Colombia.

## Análisis estadístico

Para demostrar si el tratamiento de secado (antes y después) y el muestreo tuvieron efecto significativo sobre el contenido de nutrientes y metales pesados, se determinó primero si las observaciones provenían o no de una distribución normal. Cuando lo fueron, se realizó un análisis de varianza desarrollado con 5% de probabilidad de error y cuando no, se utilizaron pruebas no paramétricas (prueba del signo y del rango signado). En el caso de los análisis microbiológicos, se realizaron pruebas del signo –no paramétricas– para evaluar si la reducción de estos microorganismos era estadísticamente significativa.

## Resultados y discusión

En la figura 1 se presenta la variación con el tiempo de la humedad del biosólido, a partir de los datos obtenidos de las pruebas de secado por circulación tangencial a diferentes temperaturas, bajo condiciones constantes



**Figura 1.** Curvas de contenido de humedad del biosólido vs. tiempo de secado a distintas temperaturas de secamiento. Biosólido de la PTAR El Salitre, Bogotá.

de secado. El contenido de humedad  $x$  se calculó a partir de la relación entre la cantidad de agua en el biosólido y el peso del biosólido seco:

$$x = \frac{P_{mh} - P_{ms}}{P_{ms}}$$

donde  $x$ , humedad en el sólido;  $P_{mh}$ , peso de muestra húmeda y  $P_{ms}$ , peso de muestra seca.

Para las temperaturas de secado a las que se trabajó, se requirieron periodos entre 180 y 300 min para llevar aproximadamente 400 g de biosólido a un contenido de humedad menor a 10%. El secado se realizó en todos los casos hasta alcanzar la humedad de equilibrio.

A partir de las gráficas de contenido de humedad en función del tiempo, se obtuvieron las curvas de rapidez de secado (figura 2), midiendo las pendientes de las tangentes trazadas a las curvas y calculando la rapidez ( $N$ ) así:

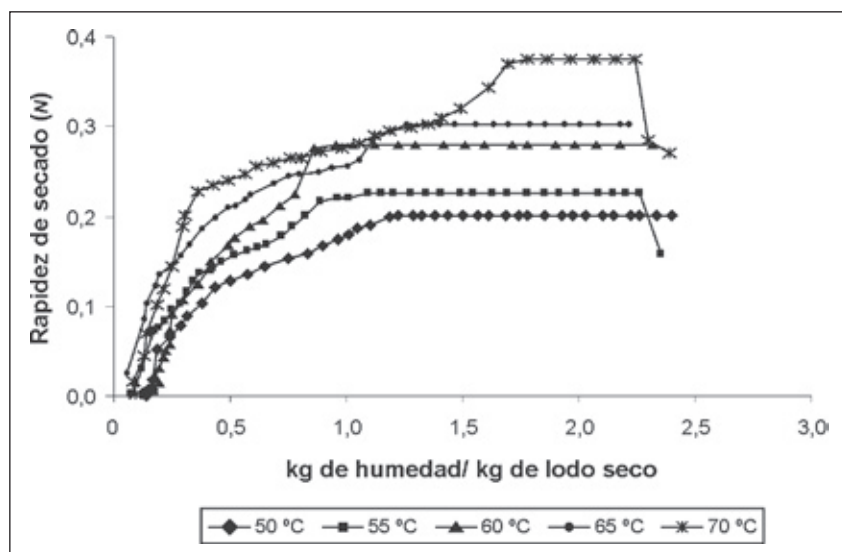
$$N = \frac{-S}{A} \cdot \frac{dx}{d\theta}$$

donde  $A$  es el área disponible para la transferencia;  $S$ , la masa del sólido seco y  $dx/d\theta$  se obtiene de las pendientes de las curvas de la figura 1 para cada uno de los puntos, utilizando el método del espejo (Treybal, 1980).

Al iniciarse el secado, la rapidez a la que se evapora la humedad en este periodo es constante –manteniendo las condiciones de secado constantes–, debido a que los capilares e intersticios del biosólido llenos de líquido

llevan líquido hasta la superficie tan rápidamente como éste se evapora. Así, se tienen periodos de rapidez de evaporación constante ( $N_c$ ) que corresponden a valores de 0,20, 0,23, 0,28, 0,30 y 0,37 para los secados a 50, 55, 60, 65 y 70 °C, respectivamente, lo que muestra que el valor de  $N_c$  se incrementa al aumentar la temperatura. Los periodos de rapidez constante obtenidos en los secados a 50, 55, 60, 65 y 70 °C fueron de 0-100, 10-95, 0-70, 0-65 y 15-40 min, lo que indica la reducción del periodo a medida que aumenta la temperatura de secado.

Cuando el contenido de humedad promedio del biosólido alcanzó el contenido crítico de humedad –humedad correspondiente al primer punto de in-



**Figura 2.** Curvas de rapidez de secado a distintas temperaturas de secamiento. Biosólido de la PTAR El Salitre, Bogotá.

flexión de la curva de derecha a izquierda, se obtuvo la primera parte del periodo decreciente de la rapidez, con contenidos de humedad de 1,23-0,84, 1,10-0,73, 0,96-0,64, 1,34-1,05 y 1,78-1,49 para los secados a 50, 55, 60, 65 y 70 °C, respectivamente, lo que en tiempo corresponde, a su vez, a 40, 30, 20, 20 y 15 min. Esto indica que a medida que aumenta la temperatura de secado decrece la rapidez de evaporación.

Al continuar el secado, la rapidez con que se puede mover la humedad a través del biosólido es el punto a tener en cuenta, a causa de los gradientes de concentración que se dan entre las partes más profundas y la superficie. En

este caso la rapidez decae aún más rápido que antes, lo que da lugar al segundo periodo de decrecimiento. El contenido de humedad del biosólido cae hasta el valor en equilibrio con la humedad del aire, y el secado se detiene.

Dentro de ciertos límites, se puede calcular la apariencia de una curva de rapidez de secado para condiciones diferentes a las utilizadas en los experimentos realizados, a partir de las curvas de la figura 2. Por ejemplo, en el caso de un escalamiento a nivel industrial, estos datos son útiles para fijar horarios de secado y determinar el tamaño del equipo (Treybal, 1980).

En la tabla 2 se presentan los contenidos de nutrientes y metales pesados obtenidos en la evaluación del efecto del secado. Las cinco muestras de biosólido fresco antes del secado presentan un contenido de humedad similar, entre 69% y 71%; después del proceso de estabilización, se llegó a valores de humedad entre 4% y 5%, bajo las condiciones de trabajo. Así, se obtuvieron contenidos de humedad menores a 10%, considerados como apropiados para su uso como abono, ya que facilitan su trituración, reducen el peso y previenen que continúe la acción biológica (Metcalf-Eddy, 1995).

Como era de esperarse, el porcentaje de C se redujo con el secado en 75%, ya que por efecto de la tempera-

**Tabla 2.** Contenido de nutrientes y metales pesados de las muestras de biosólidos, antes y después de los tratamientos térmicos.

Muestra y temperatura de secado	Hu (%)	Nutrientes*				Metales pesados* (mg · kg <sup>-1</sup> en base seca)				
		C (%)	N (%)	P (mg·kg <sup>-1</sup> )	K (mg·kg <sup>-1</sup> )	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
L1	70,4	32,9	9,98	719	168	1,18	8,06	13,2	6,71	10,7
L1s 50 °C	4,58	7,12	2,75	111	6,30	3,92	2,56	7,17	6,14	20,2
L2	70,4	33,2	8,52	366	131	1,13	9,74	12,0	13,2	10,8
L2s 55 °C	5,02	7,11	2,27	40	6,90	5,47	1,79	7,29	6,16	13,9
L3	70,0	33,1	8,42	2377	160	0,33	2,65	10,8	6,83	1,50
L3s 60 °C	4,41	7,28	2,64	154	6,60	5,62	1,61	7,53	5,81	8,20
L4	69,0	35,5	10,3	2237	118	0,81	11,1	12,6	11,2	13,1
L4s 65 °C	4,02	8,36	2,76	163	6,70	5,54	2,55	7,69	5,83	13,2
L5	71,0	32,8	8,12	1938	154	0,42	2,97	11,3	10,2	8,20
L5s 70 °C	4,67	8,63	2,69	195	7,40	7,10	1,89	7,74	5,83	18,8

L1-5, biosólidos frescos; L1s-5s, biosólidos secos; Hu, humedad.  
\*Resultados promedios de tres repeticiones, excepto para K, con dos.

tura la forma oxidable del C se degrada. De igual manera, el N se pierde en el proceso en forma amoniacal, por lo que el porcentaje de N en los biosólidos pasó de valores promedios de 9 a valores de 2,5, lo que equivale a una reducción de 70%. La cantidad inicial relativamente alta de N presente en el biosólido del Salitre se debe a que los residuos tratados en esta planta son en su mayoría de origen doméstico.

El contenido de P soluble en  $\text{NH}_4\text{F}$  en los biosólidos secos se redujo entre 85-93%; esta disminución se debe a procesos que se dan a pH moderadamente ácidos (6,0-6,7), en los que se forman fosfatos hidroxilados insolubles (Hue, 1995). Este mecanismo puede dar origen a diversos fosfatos minerales básicos que contienen hierro o aluminio, este último presente en este biosólido bajo diversas formas, según resultados previos (Rubiano, 2003).

El K extraído con DTPA en los biosólidos pasó de niveles de  $140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , antes del secado, a niveles inferiores a  $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , después del secado, lo que equivale a reducciones entre 94% y 96%. Esta fijación en los biosólidos secos puede estar asociada al hecho de que, por efecto del secado, los iones  $\text{K}^+$  pueden quedar atrapados entre las unidades cristalinas de las arcillas presentes en el biosólido. No obstante, este K en forma no intercambiable queda como un depósito importante disponible lentamente, ya que con el tiempo o por la acción de determinadas condiciones –humedad– puede liberarse, situándose en posición de intercambio (Navarro, 2000).

Del análisis de varianza desarrollado con un 5% de probabilidad de error se concluyó que el muestreo no intervino en la variabilidad del contenido de los elementos C, N, P y K; esto se traduce en que su efecto no es importante en el modelo. Se concluyó que los principales nutrientes de las plantas –N, P y K– disminuyen significativamente durante el tratamiento de secado del biosólido; sin embargo, el contenido residual es comparable con el de un abono orgánico.

El contenido de cobre disponible aumentó significativamente de  $0,77$  a  $5,53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  después del tratamiento de secado, debido a que éste puede combinarse fácilmente con la materia orgánica del biosólido, formándose complejos humus-cobre (Reicheigl, 1995). Sotomonte (2002) en un trabajo previo encontró para este biosólido un contenido en ácidos húmicos de 9,5%. El nivel de zinc se incrementó significativamente de  $8,79$  a  $14,86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , explicable porque este elemento

tiende a quedar adsorbido sobre las arcillas y la materia orgánica del biosólido (Navarro, 2000).

El contenido de Mn disponible disminuyó significativamente con el secado, hecho atribuible a la formación de complejos húmicos muy estables (Navarro, 2000).

En el caso del Ni, el nivel antes del secado es significativamente superior al nivel de este metal después del secado. De acuerdo con Zorpas y Apostoles (2001), luego del tratamiento térmico muchos de los metales pesados de un biosólido primario tratado anaeróbicamente se incorporan en las fracciones orgánicas y reducibles del biosólido. Parte de estos metales pasan a fases más estables. De esta forma, los contenidos de metales pesados disponibles –Ni y Pb–, se redujeron, mientras que el Cd y el Cr no se detectaron, por lo que no se muestran en la tabla 1.

Los resultados obtenidos comprueban el hecho observado en otras PTAR de efluentes principalmente domésticos, como es el caso del Salitre, en las que los contenidos disponibles de los metales se encuentran por debajo de los niveles establecidos por la EPA (1993), norma 503, para un biosólido clase A.

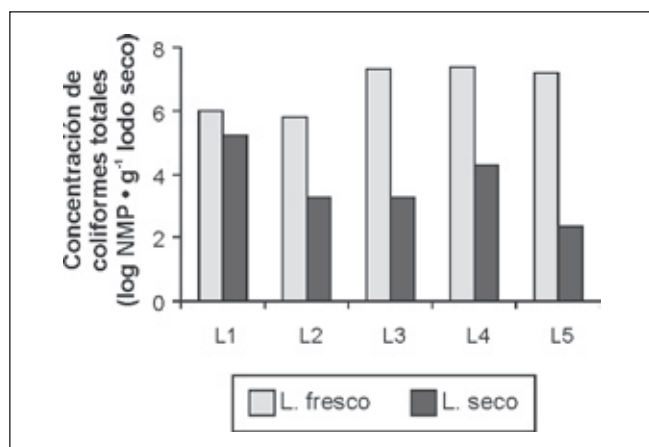
Para todos los metales determinados, los Anova evidenciaron que el aporte del muestreo del lodo a la variabilidad total explicada por el modelo fue mínimo con respecto al aporte del secado, antes y después.

El biosólido proveniente de la PTAR del Salitre contiene altas cantidades de patógenos, lo que limita su uso como fertilizante. Las bacterias patógenas más comunes en los biosólidos son: *Salmonella*, *Shigella* y *Campylobacter*. La *Salmonella typhi* causa fiebre tifoidea; la *Shigella*, disentería y la *Campylobacter*, gastroenteritis. Aunque la *E. coli* no se considera patogénica, frecuentemente se usa para indicar lo adecuado –o inadecuado– de un proceso de tratamiento en reducción de patógenos, por ser muy abundante en el biosólido.

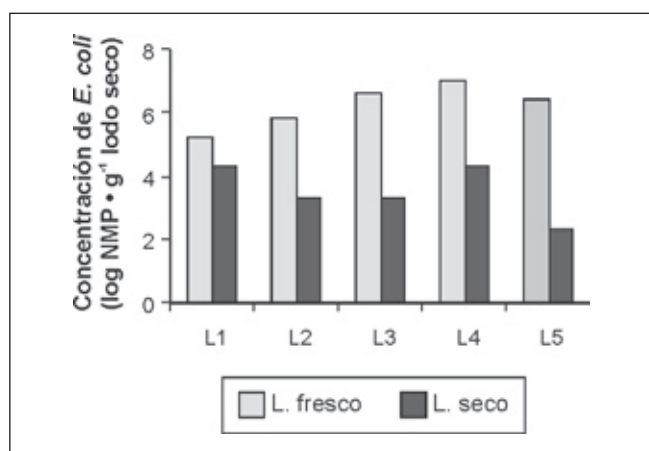
El proceso de secado térmico se aplicó para reducir las concentraciones de estos microorganismos. Los contenidos de coliformes totales y de *E. coli* en los biosólidos disminuyó en todos los casos por el tratamiento de secado. La reducción de esta población fue más evidente con el aumento de temperatura (figuras 3 y 4).

El secado a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  redujo el contenido en un orden de magnitud, tanto en coliformes totales como en *E. coli*; el





**Figura 3.** Coliformes totales en el biosólido antes y después del tratamiento de secado. PTAR El Salitre, Bogotá.



**Figura 4.** *E. coli* en el biosólido antes y después del secado. PTAR El Salitre, Bogotá.

secado a 55 °C, en dos órdenes y el secado a 60, 65 y 70 °C redujo estas poblaciones en más de cuatro órdenes de magnitud. Un biosólido clase A, autorizado para todos los usos, debe presentar concentraciones máximas de coliformes totales de 1000 NMP · g<sup>-1</sup> de peso seco antes de poderlo utilizar con fines agrícolas, lo que se cumplió para el secado a 70 °C.

Para un biosólido clase B, que puede ser usado en aplicaciones forestales, se exige una concentración de coliformes totales de hasta 2 · 10<sup>6</sup> NMP ó ufc · g<sup>-1</sup> de peso seco; puede ser utilizado con ciertas restricciones de tiempo –entre su aplicación y su disposición final– que garantizan la no viabilidad de huevos de helmintos que puedan estar presentes (EPA, 1999). Los tratamientos de secado a 55-70 °C redujeron los niveles de coliformes totales y de *E. coli* del biosólido por debajo de estos niveles.

Los biosólidos L3 y L4 presentaron un contenido alto de *Salmonella*: 1,2 · 10<sup>4</sup> y 1,3 · 10<sup>5</sup> NMP por 4 g de biosólido seco, respectivamente; sin embargo, después de secados a 60 y 65 °C, el patógeno se eliminó totalmente. En los siguientes muestreos de biosólido L1, L2 y L5 no se observó presencia de esta población, por medidas de contingencia tomadas en la PTAR El Salitre al desestabilizarse uno de los biodigestores durante los días de muestreo y representadas por la adición de soda a parte del biosólido que sale de los espesadores; este procedimiento de estabilización química eliminó el problema de la carga patógena de *Salmonella*.

Se realizó la prueba no paramétrica del signo para evaluar si la reducción de estos microorganismos fue estadísticamente significativa. Si se emplea una confiabilidad de 95%, se concluye que el total de coliformes y de *E. coli* antes del secado fue superior al total después del secado. Si se emplea una confiabilidad de 99%, se concluye que el secado no tuvo efecto en la población del total de coliformes y *E. coli*.

Se concluye que el muestreo del biosólido no afectó la variabilidad total de los contenidos de nutrientes y metales pesados, pero sí la variabilidad total de los contenidos de coliformes totales y *E. coli*.

Es de esperar que la aplicación del biosólido secado a un suelo vaya seguida de un proceso de compostaje *in situ*, cuya duración dependerá de las características del biosólido y de las condiciones medioambientales (Ortíz y Alcañiz, 1994).

## Agradecimientos

A la memoria de Diego Suárez, codirector de este proyecto. Con agradecimientos a la ingeniera Sonia Silva por su colaboración en la toma de las muestras.

## Literatura citada

- Elliot, H.A. y B.A. Dempsey. 1991. Agronomic effects of land application of water treatment sludges. J. AWWA 83, 126.
- Environmental Protection Agency [EPA]. 1993. Standards for the use or disposal of sewage sludge (40 Code of Federal Regulations Part 503). Washington D.C.
- Environmental Protection Agency [EPA]. 1999. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. EPA /625/R-92/013. Washington D.C.
- Hue, N.V. 1995. Sewage sludge. Soil amendments and environmental quality. CRC Press, Washington D.C. pp. 199-238.
- Leal, O.L. 2002. Caracterización y estudio preliminar del valor fertilizante de biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales de Bogotá (El Salitre), Cota y Guatavita. Trabajo de

- grado. Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Metcalf-Eddy. 1995. Ingeniería de aguas residuales. Volumen 2. McGraw-Hill, Madrid. pp. 865-1076.
- Navarro, G.G. 2000. Química agrícola. Mundi-Prensa, Madrid. pp. 83-269.
- Obando, D.N. 1997. Diseño, construcción y puesta en marcha de un secador directo. Trabajo de grado. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Olarte, L. 1990. Métodos analíticos de laboratorio de suelos. 4ª ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.
- Ortíz, O. y J.M. Alcañiz. 1994. Respiration potential of microbial biomass in a calcareous soil treated with sewage sludge. *Geomicrob. J.* 11, 333-340.
- Rechcigl, J.E. 1995. Soil amendments and environmental quality. Jack E. Lewis Publishers, CRC Press, Inc. pp. 199-232.
- Rubiano, A.R. 2002. Efecto de la aplicación del biosólido de la planta de tratamiento de aguas residuales el Salitre (Bogotá), sobre el comportamiento del aluminio en suelos ácidos. Trabajo de grado. Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Sotomonte, N.A. 2002. Extracción, fraccionamiento y caracterización de la materia orgánica de los biosólidos residuales de las plantas de tratamiento del Salitre, Guatavita y Cota y evaluación del efecto de aplicación de un biosólido en un suelo de baja fertilidad. Trabajo de grado. Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Treybal, R.E. 1980. Operaciones de transferencia de masa. McGraw-Hill, México. pp. 723-763.
- Zorpas, A.A. y G.V. Apostolos. 2001. Impact of thermal treatment on metal in sewage sludge from the Psitalias wastewater treatment. *J. Hazardous Materials*, 82, 291-298.