

Influencia del material de enmienda en el compostaje de lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales - PTAR

The influence of amendment material on biosolid composting of sludge from a waste-water treatment plant

Patricia Torres Lozada,¹ Juan Carlos Escobar,² Andrea Pérez Vidal,³ Ricardo Imery V.,⁴ Paola Nates,⁵ Guillermo Sánchez,⁵ Martha Sánchez,⁵ Alejandro Bermúdez,⁵

RESUMEN

Se evaluó el proceso de compostaje aerobio con volteo manual, de los lodos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo, de EMCALI EICE ESP – PTAR-C. Se usaron pilas de 1,0 toneladas conformadas por lodo, una proporción fija de material de soporte (10%) y material de enmienda. Fueron evaluados dos materiales de enmienda: cachaza y residuos orgánicos de plazas de mercado en dos proporciones peso/peso con relación al lodo, correspondientes a 20:80 y 40:60. La incorporación de material de enmienda mostró una mejora en el desarrollo del proceso que se reflejó en el inicio más rápido de la fase termofílica, la mayor permanencia de temperaturas superiores a los 55°C en todos los tratamientos en comparación con la pila *Testigo* (sin enmienda) y en una mejor relación C/N del compost obtenido al final del proceso. La incorporación de un material estructurante o de soporte también mostró un efecto favorable sobre las características de manejabilidad del lodo durante el proceso. La combinación de materiales que ofreció los mejores resultados fue: 54% lodo + 10% residuo de poda + 36% cachaza.

PALABRAS CLAVE: compostaje, biosólidos, material de enmienda, cachaza, residuos orgánicos de plazas de mercado, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR.

ABSTRACT:

Aerobic composting employing manual turning was evaluated by using the sludge produced by EMCALI EICE ESP's Cañaveralejo wastewater treatment plant (PTAR-C). Compost (in 1,0 ton piles) consisted of sludge, a fixed proportion of bulking agent (10%) and amendment material. Sugarcane waste and solid organic (marketplace) waste were evaluated as amendment material using 20/80 and 40/60 weight/weight (amendment/sludge) ratios. Incorporating the amendment material improved the compost, being reflected in a faster start for the thermophilic phase, higher temperatures being maintained (>55°C) and better C/N ratio obtained in the compost in all treatments compared to the pile which had no amendment added to it. Incorporating the bulking agent improved sludge manageability during composting; the best combination was 54% sludge + 10% sugarcane bagasse + 36% liquid sugarcane waste.

KEY WORDS: composting, biosolid, amendment material, sugar cane waste, solid organic waste, wastewater treatment plant.

Recibido: agosto 14 de 2004

Aceptado: junio 17 de 2005

1. Ingeniera sanitaria, Universidad del Valle, MSc y PhD Universidad de São Paulo, Brasil, e-mail: patoloz@univalle.edu.co profesora asociada, - Escuela EIDENAR. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle.

2. Ingeniero sanitario, Universidad del Valle, MSc y PhD Universidad de São Paulo, Brasil.

Coordinador Área de Procesos PTAR–Cañaveralejo, Empresas Municipales de Cali, EMCALI EICE ESP.

3. Ingeniera sanitaria, Universidad del Valle, Escuela EIDENAR, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, e-mail: andreaperezvidal@hotmail.com

4. Ingeniero sanitario MSc, Universidad del Valle, Escuela EIDENAR, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle.

5. Ingenieros sanitarios, Universidad del Valle.

Introducción

El tratamiento de las aguas residuales como alternativa de solución para disminuir la contaminación de las fuentes receptoras, ha traído consigo impactos positivos para la recuperación de dichas fuentes; sin embargo, su tratamiento, independiente de la tecnología empleada, genera subproductos como lodos y biosólidos, los cuales si no son tratados y/o aprovechados, pueden convertirse en otra fuente de contaminación ambiental.

A medida que se implementa un mayor número de plantas de tratamiento de aguas residuales, se incrementa la producción de lodos y biosólidos y por tanto la necesidad de encontrar una solución viable y sostenible para las condiciones propias del medio. El manejo de estos residuos es uno de los mayores desafíos técnicos y operacionales del sistema, pudiendo llegar a representar hasta el 60% de los costos de operación de toda la PTAR.

La producción de biosólidos de las tres principales PTAR del país (El Salitre de Bogotá, Cañavalejo de Cali y San Fernando de Medellín) puede llegar a las 111.000 toneladas anuales de biosólidos (BAS, 2002), la cual aumentará a medida que se mejoren y amplíen los sistemas.

La PTAR de Cañavalejo de la ciudad de Cali genera entre 60-80 ton/día de biosólido deshidratado dependiendo de la cantidad y concentración de sólidos totales del agua residual tratada y la modalidad de operación (sedimentación convencional o tratamiento primario avanzado). Este material es actualmente dispuesto en un monorelleno cuya capacidad se colmatará en pocos años, siendo necesario evaluar alternativas sostenibles de disposición y/o aprovechamiento del mismo. El compostaje se ha planteado como una alternativa viable para el manejo de los biosólidos generados en la PTAR-C.

Durante este estudio se evaluó la influencia de la incorporación de dos materiales de enmienda (cachaza y residuos orgánicos de plazas de mercado, ROPM) al lodo espesado y deshidratado de la PTAR con el objetivo de mejorar la calidad del producto final. Se empleó una proporción fija de material de soporte (residuo de poda) para garantizar la adecuada estructura y manejabilidad del biosólido.

Marcos teórico

En la mayoría de los procesos de tratamiento normalmente empleados en el tratamiento de las aguas residuales se generan lodos como resultado de la separación de la fase sólida-líquida (sedimentación, flotación, etc.) o durante procesos químicos o biológicos. Estos sólidos usualmente experimentan una serie de procesos como espesamiento, estabilización, deshidratación y disposición final. El lodo producido en los sistemas de tratamiento de aguas residuales es considerado biosólido cuando ha sido previamente estabilizado, en caso contrario se emplean términos como torta, lodo o sólidos (Goncalves y Ludovice, 2000).

Los lodos y biosólidos contienen el mismo tipo de microorganismos patógenos que el agua residual, pero en una mayor concentración debido a la reducción del contenido de agua por espesamiento o deshidratación; su aplicación directa a cualquier cuerpo receptor (suelo, fuentes superficiales, mar) sin tratamiento previo representa un riesgo para la salud humana y biótica (Kiely, 1999).

El suelo, como cuerpo receptor, puede constituir un medio favorable desde el punto de vista de la remoción de patógenos, pues las condiciones físico-químicas imperantes especialmente en la superficie (efectos del sol, rayos ultravioleta y sequía), y la competencia con otros microorganismos presentes habitualmente en él, pueden destruirlos rápidamente, lo cual constituye un punto a favor para la aplicación directa de biosólidos en ciertos terrenos, teniendo el cuidado de respetar plazos sanitarios antes del cultivo y distancias límites recomendables (Sanepar, 1999).

Los lodos y biosólidos pueden ser utilizados en la agricultura como abono, es decir, como un producto capaz de proporcionar a los cultivos elementos nutritivos necesarios para su crecimiento y su desarrollo. También algunos biosólidos, transformados en *compost* o tratados con cal, pueden jugar un papel importante como fertilizantes, lo que significa mantener o mejorar la estructura del suelo, su actividad biológica, o también controlar su acidez (ADEME, 2001). Se estima que un 40% de la producción europea de biosólidos de PTAR's se utiliza en la agricultura y cerca del 50% en los Estados Unidos (Jaramillo, 2002).

El proceso de compostaje constituye una forma viable para una mejor estabilización de biosólidos, principalmente cuando tienen limitaciones de tipo microbiológico para su uso benéfico, lo cual facilita su disposición final al poderlos aplicar directamente en áreas de cultivo para incrementar producción y enriquecer o mejorar la calidad del suelo.

El compostaje es un proceso biológico aerobio en el que la materia orgánica sufre degradación bioquímica hasta dar lugar a un producto final estable (Metcalf & Eddy, 1997). Es una alternativa de tratamiento para una amplia gama de residuos orgánicos, que permite reducir el volumen del material de desecho, disminuir olores desagradables, evitar la presencia de insectos y vectores, eliminar patógenos (gracias a las altas temperaturas que se generan dentro del proceso) y reciclar nutrientes y oligoelementos útiles para el suelo.

En esencia, todos los procesos de compostaje se basan en los mismos principios y generan el mismo tipo de productos (dióxido de carbono, agua, minerales y materia orgánica estabilizada) a través de un proceso que imita la fermentación natural que ocurre normalmente en un suelo (pero acelerada, intensificada y dirigida) llevada a cabo por microorganismos como bacterias, hongos y actinomicetos (Kiely, 1999).

El *compost* es el producto final obtenido del proceso de compostaje y se caracteriza por ser estabilizado, inocuo,

libre de sustancias fitotóxicas y con alto valor fertilizante (Costa et al., 1994). Posee la facultad de enmendar las características físicas del suelo pues contribuye a la estabilidad de las estructuras de sus agregados, gracias a la acción de la materia orgánica; aumenta su capacidad de retención de agua, lo que le confiere resistencia ante la sequía; mejora su porosidad, lo que facilita su aireación y por ende la respiración de las raíces; y aumenta la infiltración y la permeabilidad al mejorar su estructura.

Desde el punto de vista químico, el *compost* ofrece grandes beneficios debido a que tiene una capacidad de intercambio catiónico superior al de cualquier arcilla; suministra nitrógeno, potasio y fósforo; aporta oligoelementos tales como hierro, manganeso, zinc, boro, molibdeno y cobre, y contribuye a solubilizar algunos elementos minerales del suelo, facilitando su asimilación por las plantas. También, la actividad biológica del suelo se ve favorecida por la aplicación de *compost*, no sólo por el aporte de un número importante de bacterias sino por el estímulo al desarrollo de microorganismos autóctonos que contribuyen a la descomposición de componentes minerales insolubles como los fosfatos, que son necesarios para el desarrollo de las plantas y evitan la lixiviación del nitrógeno soluble al transformarlo en nitrógeno orgánico (Romero, 1982).

Mezclas utilizadas en el compostaje de lodos y biosólidos

Los lodos y biosólidos generados en PTAR's, por su carácter de masa compacta tienden a tener dificultades para la fermentación, ya que no se airean fácilmente, lo que obliga a mezclarlos con materiales de soporte que disminuyan la humedad y aumenten la porosidad; estos materiales deben ser sustancias resistentes a la fermentación y que puedan ser recuperadas y reutilizadas al final del proceso de compostación. Desde el punto de vista de su composición, los lodos y biosólidos son productos ricos en nitrógeno pero que a menudo presentan déficit de fósforo y de otros elementos esenciales para el proceso de compostaje, por lo que se deben mezclar con algún material de enmienda que mejore estas deficiencias.

Paulet, S. y Soliva, M. (2001) afirman que las pérdidas de nitrógeno, que se identifican por la relación C/N, parecen ser una falencia generalizada en las experiencias de compostaje de lodos de PTAR, por lo que es necesario encontrar un material adecuado, rico en carbono, que compense el exceso de nitrógeno amoniacal de estos lodos y a la vez contribuya positivamente o al menos no influya de manera adversa en el comportamiento de otras variables igualmente importantes como la porosidad y la humedad, entre otras. Los materiales de enmienda evaluados en este estudio fueron: cachaza y residuos orgánicos de plazas de mercado.

La *cachaza* es el conjunto de espumas e impurezas que sobrenadan en el jugo de la caña de azúcar al someterlo a la acción del fuego. Físicamente, es un

material esponjoso, amorfo, de color oscuro a negro, que absorbe grandes cantidades de agua; se le conoce también como torta de filtro y es el principal residuo de la industria de la caña de azúcar. Su composición varía con las características agroecológicas de la zona, cosecha, eficiencia de fábrica, método de clarificación empleado, entre otros factores. Es generalmente rica en fósforo, calcio y nitrógeno, y pobre en potasio debido a la gran solubilidad de este elemento, el cual se pierde en los jugos y es separado con la melaza y la vinaza. Los altos contenidos en nitrógeno se deben a la elevada cantidad de materia orgánica que presenta este residuo. Su contenido de micronutrientes se deriva parcialmente de las partículas que van adheridas a la caña. Este material también es fuente importante de magnesio y zinc (Nates y Sánchez, 2005).

Los *Residuos orgánicos de plazas de mercado* –RPM forman parte de los residuos sólidos urbanos; sin embargo, estos últimos normalmente se originan a nivel doméstico, conteniendo algunos alimentos ya cocidos o procesados, mientras que los primeros están compuestos por residuos crudos. Su calidad está relacionada con factores regionales y climáticos, costumbres y hábitos, nivel sociocultural y económico, entre otros (Jaramillo, 1999).

Metodología

Se conformaron pilas de 1,0 toneladas utilizando lodo espesado y deshidratado – LodoED de la PTAR-C, residuo de poda de las zonas verdes de la ciudad de Cali previamente triturado como material de soporte, y material de enmienda. Se evaluaron dos materiales de enmienda: *cachaza* procedente de un ingenio azucarero, y los *residuos orgánicos de plazas de mercado* – ROPM procedentes de la central de abastos de la región.

El orden de mezcla de los materiales para la conformación de las pilas fue el siguiente: se combinó primero el material de soporte con el lodo y posteriormente se incorporó el material de enmienda, con el fin de evitar la formación de grumos y compactación de las pilas.

Dado que el sustrato objeto de estudio fue el lodo de la PTAR-C, el criterio fundamental para la conformación de las pilas y selección de proporciones fue garantizar al menos un 50% del mismo.

Se conformaron 5 pilas con su respectivo duplicado para un total de 10, evaluándose dos proporciones peso/peso de los materiales de enmienda. En todas la pilas, el material de soporte se usó en una proporción en peso fija del 10% (Torres et al., 2004).

Las características de cada pila son mostradas en la Tabla 1. Las pilas 1A y 1B fueron conformadas sólo con lodo, las pilas 2 y 3 correspondieron a las mezclas con el ROPM, y las 4 y 5 a las mezclas con cachaza.

Tabla 1. Composición de pilas y proporción de los materiales utilizados

MATERIAL	PILA-									
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
% Lodo Espesado y Deshidratado	100	100	72	72	54	54	72	72	54	54
% Material Enmienda	0	0	18	18	36	36	18	18	36	36
% Material Soporte	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10
Porcentaje Total de Mezcla	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

ROPM: Residuos orgánicos de plazas de mercado

Seguimiento y control del proceso

El seguimiento del proceso de compostaje se realizó durante un período de 106 días. La Tabla 2 muestra las variables de control y respuesta medidas durante el estudio.

Tabla 2. Variables de control y respuesta medidas en el estudio

VARIABLE	FRECUENCIA	MÉTODO DE ANÁLISIS
Variables de Control		
pH	3 veces/ semana	Potenciométrico
Temperatura	Diaria	-
Porcentaje de Humedad	3 veces/semana	Gravimétrico
Volteo	2 veces / semana*	-
Altura de pila	Antes y después de cada volteo	Medición directa
Riego	En cada volteo si la Humedad < 45%	-
Variables de respuesta**		
Carbono orgánico	4 veces durante el proceso	Digestión y Titulación.
Nitrógeno total	4 veces durante el proceso	Digestión y Titulación.
Nitrógeno Amoniacal	4 veces durante el proceso	Digestión y Titulación.
Fósforo	4 veces durante el proceso	Digestión y Espectrofotometría.
Potasio	4 veces durante el proceso	Espectrofotometría.
Calcio	4 veces durante el proceso	Espectrofotometría.
Magnesio	4 veces durante el proceso	Espectrofotometría.
Sodio	4 veces durante el proceso	Espectrofotometría.
Hierro	4 veces durante el proceso	Espectrofotometría.
Cobre	4 veces durante el proceso	Espectrofotometría.
Zinc	4 veces durante el proceso	Espectrofotometría.
Manganeso	4 veces durante el proceso	Espectrofotometría.
Boro	4 veces durante el proceso	Espectrofotometría.
Densidad Aparente***	Final del proceso	Método del núcleo
Densidad Real***	Fina del proceso	Método del Picnómetro
Porosidad***	Final del proceso	Relación entre densidad real y aparente.
Huevos de Helmintos viables	4 veces durante el proceso	Método de Bailenger modificado.
Coliformes Totales	4 veces durante el proceso	Método de Unidades Formadoras de Colonia.
Coliformes Fecales	4 veces durante el proceso	Método de Unidades Formadoras de Colonia.

*El volteo disminuyó a una frecuencia de una vez/semana en la fase de maduración.

**Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 20ª edición, 1998.

Una vez finalizado el proceso de compostaje, se tamizaron las pilas usando inicialmente un tamiz de 10 mm con el fin de retirar grumos y material grande, posteriormente se utilizó un tamiz de luz de malla de 5 mm para dar el acabado final al *compost*.

Resultados y discusión

Las características iniciales de cada uno de los materiales empleados en este ensayo se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características fisicoquímicas, microbiológicas y parasitológicas de los materiales usados en el estudio.

CARACTERÍSTICA	Lodo ED	Material Soporte		Material Enmienda	
		Poda	Cachaza	RPM	ROPM
Fisicoquímicos					
pH	6.70	7.30	8.0	7.40	7.40
Carbono Orgánico %	16.70	25.40	17.60	13.70	13.70
Materia Orgánica %	28.79	43.79	30.34	23.62	23.62
Nitrógeno Amoniacal %	0.29	0.05	0.03	0.04	0.04
Nitrógeno Total %	2.37	1.64	1.22	1.39	1.39
Fósforo %	0.87	0.16	1.49	0.26	0.26
Relación C/N	7.05	15.49	14.43	9.86	9.86
Relación C/P	19.20	158.75	11.81	52.69	52.69
Potasio %	0.10	0.59	0.21	0.94	0.94
Calcio %	0.07	0.08	0.06	0.02	0.02
Magnesio %	0.01	0.001	0.002	0.001	0.001
Sodio %	0.08	0.05	0.06	0.21	0.21
Hierro %	4.20	0.76	2.30	1.20	1.20
Cobre %	0.0154	0.0013	0.0072	0.0034	0.0034
Zinc %	0.083	0.023	0.089	0.062	0.062
Manganeso %	0.032	0.015	0.054	0.024	0.024
Boro %	0.039	0.006	0.006	0.007	0.007
Humedad %	69.2	18.9	72.6	71.3	71.3
Microbiológicos/Parasitológicos					
Coliformes Totales (UFC/gr lodo)	4.3*10 ¹⁰	3*10 ¹⁰	5.7*10 ¹⁰	1.14*10 ⁷	1.14*10 ⁷
Coliformes Fecales (UFC/gr lodo)	7.1*10 ⁸	4.2*10 ¹⁰	2.5*10 ⁹	7.2*10 ⁶	7.2*10 ⁶
Huevos de Helmintos Viables /gr Lodo	13	9	13	3	3

De acuerdo con la Tabla 3, se observa que el pH en todos los materiales se encuentra dentro del rango recomendado para lograr un óptimo proceso de compostaje, el cual según Kiely (1999) debe oscilar entre 6.5 y 8.0 unidades. La principal diferencia entre los dos materiales de enmienda es el contenido de carbono y nitrógeno, los cuales son mayores en la cachaza que el ROPM. Al compararlos con el lodo ED, la principal diferencia que se observa es la menor concentración de nitrógeno orgánico en los primeros. Esto hace que al mezclarse los materiales de enmienda con el lodo, mejore la relación C/N inicial tan importante en el proceso de compostaje; sin embargo, esta relación en ninguno de los materiales alcanza los valores recomendados por la literatura con excepción del residuo de poda. Sanepar (1999) muestra que la relación C/N inicial puede oscilar entre 20-30.

La concentración de los otros elementos es similar en ambos materiales de enmienda, con excepción del sodio y el potasio, que son mayores en el ROPM, y el hierro, que es mayor en la cachaza. Todos los valores excepto el del hierro en el lodo, se encuentran entre los valores recomendados para el proceso de compostaje, el cual, según Serapio (1996), debe ser inferior al 3%.

La humedad es similar en los materiales de enmienda y el lodo ED, encontrándose dentro de lo recomendado para el proceso de compostaje. Kiely (1999) indica valores óptimos de humedad entre el 50-60% para garantizar una eficiente actividad metabólica, porcentajes menores del 20% cesan la biodegradación y porcentajes superiores favorecen condi-

ciones anaerobias por la baja porosidad y tendencia a la compactación de los montones y consecuente lentitud en el proceso de compostaje. Otros autores como Kuter (1995) y Abad *et al.* (1996) establecen valores óptimos entre 30-60% y mayores a 30% respectivamente.

Desde el punto de vista microbiológico y parasitológico, no se observan diferencias entre los materiales de enmienda, de soporte y el lodo, presentando todos una elevada contaminación.

La Figura 1 muestra las curvas de tendencia de la temperatura durante todo el proceso de compostaje para cada uno de los tratamientos evaluados (promedios).

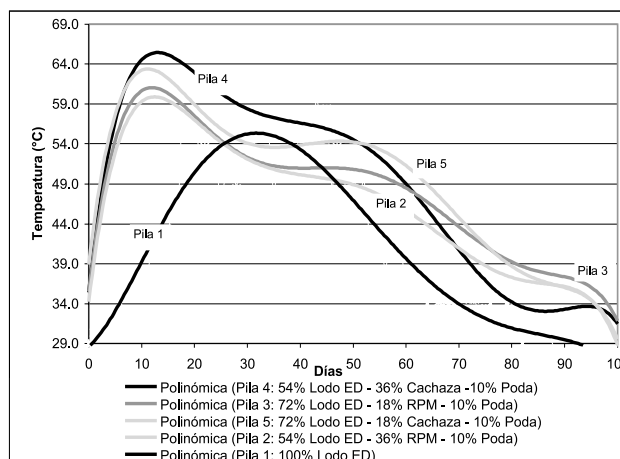


Figura 1. Curvas de tendencia de la temperatura durante el proceso de compostaje

De acuerdo con la Figura 1, se observa que la pila 1 correspondiente al 100% lodo presentó una fase mesofílica de aproximadamente 14 días, mostrando un retraso en el arranque de la etapa termofílica en comparación con las otras pilas en que se usó material de enmienda, indicando que su incorporación mejoró la eficiencia del proceso de compostaje.

La Tabla 4 resume el tiempo de duración de la fase mesofílica, las máximas temperaturas alcanzadas y el número de días en que la temperatura se mantuvo por encima de los 45 y 55 °C.

Tabla 4. Temperatura máxima alcanzada y número de días en que fue superior a 45 y 55 °C

Pila N°	Composición	Duración aprox. Fase Mesofílica (días)	Temperatura Máxima Alcanzada °C	N° de días con Temperatura > 45°C	N° de días con Temperatura > 55°C
1	100% Lodo Espesado Deshidratado (Lodo ED)	14	64.0	36.0	10.0
2	10% Poda + 54% Lodo ED + 36% ROPA	3	63.4	55.0	15.0
3	10% Poda + 72% Lodo ED + 18% ROPA	3	67.1	63.0	17.0
4	10% Poda + 54% Lodo ED + 36% Cachaza	3	68.5	60.0	42.0
5	10% Poda + 72% Lodo ED + 18% Cachaza	3	68.4	68.0	32.0

En esta tabla se observa que durante la fase termofílica se alcanzaron temperaturas superiores a los 55°C durante un periodo superior a dos semanas, con excepción de la pila 1. La permanencia de estas temperaturas garantiza una adecuada higienización del material, para lo cual Kiely (1999) sugiere que si se logra sostener la temperatura por encima de los 55°C durante al menos dos semanas o por encima de 70°C durante una hora, se lograría una eficiente remoción de patógenos; así mismo, la norma chilena - NCh2880-2004, establece que la temperatura debe sostenerse por encima de los 55°C durante al menos tres días consecutivos antes de un volteo, o entre 45 - 50°C durante 12 días consecutivos para lograr una adecuada reducción de patógenos.

Las pilas en las que se evaluaron las dos proporciones del residuo orgánico de plazas de mercado – ROPM como material de enmienda, presentaron un comportamiento muy similar entre ellos durante todo el proceso y en la calidad del producto final, indicando que no existe un beneficio adicional al incorporar un mayor porcentaje de este material al proceso. Cabe resaltar que su incorporación mejoró el proceso en comparación con la pila 1, correspondiente al 100% lodo.

Las pilas con cachaza como material de enmienda, para las dos proporciones evaluadas, presentaron un mejor comportamiento, que se reflejó en una mayor permanencia de temperaturas por encima de los 55°C (32-42 días).

En general, se observó que la incorporación de los dos materiales de enmienda evaluados permitió optimizar el arranque del proceso de compostaje. Sin embargo, la cachaza, en la proporción del 36%, mostró los mejores resultados, definiéndose la combinación de 54% Lodo ED + 10% Poda + 36% Cachaza como la que mostró los efectos más favorables sobre el proceso de compostaje.

Respecto al porcentaje de nitrógeno amoniacal al final del proceso, se encontró que todas las pilas presentaron un valor inferior al 0.03%, valor exigido por la norma australiana AS4454, y a 0.04% valor recomendado por Gómez (2000), indicando que se terminó de manera eficiente la etapa de enfriamiento y maduración.

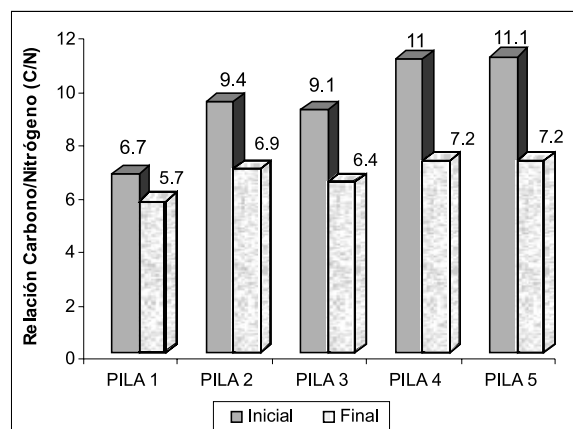


Figura 2. Relación C/N al inicio y final del proceso.

Respecto a la relación C/N, en la Figura 2 se observa que la pila 1 (100% lodo) mostró una relación inferior a las obtenidas con las otras pilas en las que se adicionó un material de enmienda, indicando que la calidad del producto final adquiere un mayor potencial agrícola al combinarse con este tipo de materiales.

De acuerdo con Sanepar (1999), independientemente del valor inicial, al final del proceso de compostaje este parámetro tiende a converger a un valor entre 10 y 20, debido a la pérdida progresiva de carbono en forma de CO₂; algunas normas como la australiana AS4454 establece valores entre 20-40 y la norma chilena NCh2880-2004 clasifica el *compost* como clase A si la relación C/N es menor o igual a 25. En este estudio se observó que en términos de esta variable el *compost* obtenido en todas las pilas puede ser clasificado como Clase A; adicionalmente se observó que la relación C/N final obtenida para los dos materiales de enmienda no difieren mucho entre sí, y por el contrario, fueron mejores que las logradas en la pila 1, correspondiente al 100% lodo.

Respecto a los análisis parasitológicos, el recuento de huevos de helmintos viables al final del proceso de compostaje fue cero en todas las pilas. La eliminación total de parásitos permite resaltar la acción higienizadora del compostaje, estableciendo una correlación entre las

altas temperaturas alcanzadas y el número de días de permanencia de las mismas con la eliminación de huevos de helmintos.

Las figuras 3 a) y b) muestran los resultados de los análisis microbiológicos al inicio y final del proceso de compostaje, en términos de coliformes totales y fecales, donde se observa una reducción en las concentraciones desde 1.010 hasta 105. Esta reducción fue debida a las altas temperaturas alcanzadas y el tiempo de permanencia de las mismas durante el proceso de compostaje; sin embargo, no fueron suficientes para la higienización total del material.

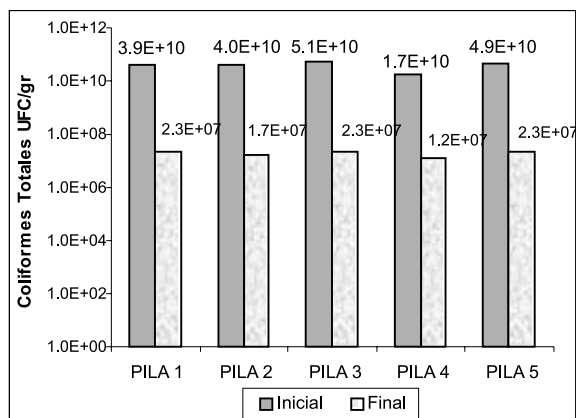


Figura 3a. Evolución de los coliformes totales a través del proceso de compostaje.

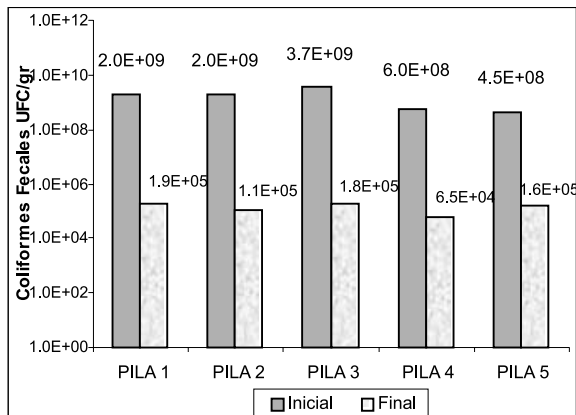


Figura 3b. Evolución de los coliformes fecales a través del proceso de compostaje

A pesar de que en todas las pilas, con excepción de la 1 (100% lodo) lograron la permanencia de las temperaturas sugeridas en la norma chilena, no se alcanzó la reducción de patógenos exigidos por la norma colombiana ICONTEC NTC 5167 para materiales usados como fertilizantes y acondicionadores, la cual exige un valor inferior de 1.000 UFC/gr para enterobacterias totales. Para incrementar la reducción de patógenos en términos de coliformes totales y fecales se recomienda mejorar las condiciones de aislamiento de la compostera para evitar el paso de animales y aves, los cuales pueden convertirse en fuente de recontaminación.

Desde el punto de vista de manejo de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales y comparando el peso final e inicial de la pila 1, conformada con lodo, se alcanzó una reducción aproximada del 70%, lo que indica que el compostaje es una alternativa que además de mejorar la calidad del lodo para su potencial aprovechamiento, también es una alternativa favorable desde el punto de vista del requerimiento de área para su disposición final.

En general, esta investigación permitió verificar que el lodo espesado y deshidratado generado en la PTAR-C puede ser compostado; sin embargo, para alcanzar un proceso eficiente, es necesario incorporar un agente estructurante (material de soporte) y un material de enmienda. En este caso el material de enmienda que mostró un mejor desempeño fue la cachaza, en la proporción del 36%. Sin embargo, se recomienda evaluar otros materiales disponibles en la región que permitan dar flexibilidad al proceso de compostaje en caso de que los materiales escaseen, y mejorar el aporte de carbono para incrementar su potencial agrícola.

Conclusiones

- El estudio mostró la viabilidad del uso de la tecnología de compostaje como una alternativa de manejo, aprovechamiento y disposición de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales.
- La incorporación tanto de la cachaza como de los residuos orgánicos de plazas de mercado - ROPM mostró un efecto favorable durante el proceso de compostaje del biosólido desde el punto de vista de eficiencia y calidad del producto final. La cachaza en la proporción del 36% fue el material que mostró mejores resultados en términos del desempeño del proceso en una combinación de materiales de 54% Lodo ED + 10% Poda + 36% Cachaza.
- De acuerdo con la norma chilena 2880 el *compost* obtenido en todas las pilas evaluadas puede ser catalogado como Clase A desde el punto de vista de calidad fisicoquímica; sin embargo, no satisface los requerimientos microbiológicos descritos en la misma.
- El proceso de compostaje permitió la reducción del lodo en aproximadamente un 70% del peso inicial, mostrando esta tecnología como una alternativa viable para la minimización de residuos y requerimientos de área para disposición final.
- Se recomienda la evaluación de otros materiales de enmienda que aporten mayor carbono orgánico con el fin de mejorar la relación C/N inicial y por tanto la calidad del producto final.

Agradecimientos

La investigación fue desarrollada por la Universidad del Valle, las Empresas Municipales de Cali y la Fundación BIOCIUDAD, con el apoyo financiero de COLCIENCIAS, el BID y el OCyT.

Nomenclatura

BAS:	Bogotana de Aguas y Saneamiento
C/N:	Relación Carbono/Nitrógeno
LodoED:	Lodo espesado y deshidratado
PTAR:	Planta de tratamiento de aguas residuales
ROPM:	Residuos orgánicos de plazas de mercado
SANEPAR:	Compañía de Saneamiento de Paraná
WEF:	Water Environmental Federation

Bibliografía

Abad, M.; Martínez, P. y Martínez, J., *Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo*, Departamento de producción vegetal, Universidad Politécnica, Valencia, 1996.

Ademe, *Dechets organiques. Composts de boves de stations d'épurations municipales: qualites agronomiques utilisation*, Agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie, Ademe éditions, France, septembre 2001, No. 3276, 428 pp.

As 4454-1999, *Australian standard compost, soil conditioners and mulches*, Australia, 1999.

Bogotana de Aguas y Saneamiento - Suez Lyonnaise Des Eaux - Degremont ESP S.A., presentación en taller de biosólidos, Bogotá, 2002.

Costa, F. et al., *Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización*, Caja de Ahorros de Murcia, España, 1994.

Colciencias, Universidad del Valle, Empresas Municipales de Cali, OCyT, BID y Fundación Biocidad, *Evaluación de la tecnología de compostaje para el aprovechamiento de los biosólidos generados en la PTAR-Cañaveralejo de EMCALI EICE ESP*, Cali, 2004.

Goncalves, R.F. y Ludovice, M., "Alternativas de minimizacao da producto e desaguentamento de lodo de

esgoto", en: *Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto*. Embrapa Meio Ambiente, 312 pp. 2000.

Gómez, J., *Abonos orgánicos*, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, 2000.

Jaramillo, L.A., "Visión integral de los biosólidos. En: taller de biosólidos", Bogotá, abril, 2002.

Kiely, G., *Ingeniería ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*, Mc Graw-Hill / interamericana de España, S.A., 1999, Vols. I, II Y III, 1331 pp.

Kuter, G. et al., *Biosolids composting*, Water Environmental Federation, USA, 1995.

Metcalf & Eddy, *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*, México, Mc Graw-Hill, 1997.

Nates, P. y Sanchez, G., *Evaluación de la cachaza como material de enmienda para el compostaje de los lodos en la PTAR Cañaveralejo*, Cali, Universidad del Valle, 2005.

NCh2880.c2004. "Compost – Clasificación y requisitos", Chile, 2004.

Norma Técnica Colombiana NTC 5167, "Productos para la industria agrícola y materiales usados como fertilizantes y acondicionadores Icontec 2003".

Paulet, S. y Soliva, M., *Compostaje de residuos orgánicos y aplicación agrícola*, Escuela de Ingeniería Técnica Agrícola de Barcelona, España, 2001.

Romero, I., "El compost como factor determinante para una mejor producción agraria", en Boletín de Información del Medio Ambiente (BIMA), No. 2, abril – junio.1982.

Sanepar, *Reciclagem de biosólidos. Transformando problemas em soluções*, Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar, editado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, Finep, CNPQ y Capes, Curitiba, Brasil, 1999, 300 pp.

Serapio, F. y Bruzon, C., *Curso de abono y sustratos orgánicos*, Universidad Nacional de Colombia, 1996.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

La Maestría en Ingeniería de Sistemas y Computación fue creada mediante Acuerdo No. 47 de 1984 del Consejo Superior Universitario, y su última modificación está contenida en el Acuerdo No. 028 de 2004. Actualmente se rige en el acuerdo No. 20 de 2001 del Consejo Académico y la Resolución 083 de 2004 del Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería, los que consignan los principios y normas que lo orientan.

- Promover y generar investigación en el área de Ingeniería de Sistemas o en forma interdisciplinaria, mediante proyectos estructurados y orientados a generar conocimientos o comprobar aquellos que forman parte del saber.
- Crear y adaptar tecnologías para dar soluciones a los problemas de la sociedad y de nuestro medio.
- Incrementar y mejorar la preparación de los docentes universitarios en el área de Ingeniería de Sistemas y otras disciplinas relacionadas en las que se requiera de una formación avanzada

Mayores informes: Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C.
Teléfono: (57 1) 316 50 00 Ext. 14120-14041-14068.
Página web: www.ing.unal.edu.co/posgrados/principal