

INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA DE VOLTEO PARA EL CONTROL DE LA HUMEDAD DE LOS SUSTRATOS EN EL COMPOSTAJE DE BIORRESIDUOS DE ORIGEN MUNICIPAL

Edgar Ricardo OVIEDO OCANA^{1,2*}, Luis Fernando MARMOLEJO REBELLÓN¹ y Patricia TORRES LOZADA¹

¹ Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Universidad del Valle, Calle 13 # 100 – 00, A.A 25360, Cali, Colombia

² Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas, Universidad Industrial de Santander, Cra. 27 con calle 9, Bucaramanga, Colombia

*Autor responsable; edgar.oviedo@correounivalle.edu.co, eroviedo@uis.edu.co

(Recibido enero 2013, aceptado noviembre 2013)

Palabras clave: aireación, calidad producto, proceso biológico, residuos orgánicos, sustratos

RESUMEN

Los sustratos del compostaje de biorresiduos de origen municipal (BOM) se caracterizan por el alto contenido de humedad que puede afectar la evolución del proceso de transformación aerobia de la materia orgánica. Una estrategia de control de la humedad durante el proceso de compostaje es el incremento en la frecuencia de volteo de las pilas. Este estudio evaluó la influencia de la aplicación de esta estrategia para el control de la humedad inicial en el compostaje de BOM, para lo cual se montaron dos tipos de pilas a escala piloto (570 kg) con diferente frecuencia de volteo durante las cuatro primeras semanas del proceso; la pila A con al menos dos volteos semanales y la pila B con seis volteos semanales. Los resultados indican que el aumento en la frecuencia de volteos fue efectivo para reducir la humedad inicial de los sustratos, obteniendo una mayor tasa de degradación de la materia orgánica, que se reflejó en un 20 % menos del tiempo de duración de las fases mesofílica, termofílica y de enfriamiento y además, en un mayor mantenimiento de las temperaturas de higienización (siete días adicionales). El incremento en la frecuencia de volteo disminuyó el contenido de nutrientes (N_{Total} , P_{Total} y K_{Total}) y del carbono orgánico total (COT) y por ende el valor agronómico del producto, no obstante, se favoreció la disminución de sustancias fitotóxicas alcanzando un mayor índice de germinación y menores valores de conductividad eléctrica.

Key words: aeration, product quality, biologic process, organic waste, substrate

ABSTRACT

Substrates of biowaste composting are characterized by high moisture contents that affects the aerobic transformation of organic matter. A strategy for moisture control on the process is achieved by increase of turning the pile to a certain frequency. This study assesses the influence of this strategy for the initial moisture control in biowaste composting. Two types of pilot-scale piles were assessed with different turn frequencies during the first four weeks of the process. Pile A was turned at least two times per week and pile B six turns per week. Results show that the increase on the turn frequency

was effective for reducing initial moisture of the substrates. A high degradation rate of organic matter was achieved. This was reflected in a shorter duration of the mesophilic, thermophilic and cooling phases (20 % less time). Furthermore, the sanitation temperatures were kept for seven additional days. The increase on the turn frequency influences the nutrient content and COT decrease and hence the agronomic value of the product. In addition, this increase favored the reduction of phytotoxic substances allowing a higher germination index and less electric conductivity.

INTRODUCCIÓN

La calidad del compost depende de las características fisicoquímicas de los sustratos, del control del proceso así como del tiempo de maduración del producto (Chiumenti *et al.* 2005, Hargreaves *et al.* 2008, de Guardia *et al.* 2010). Estudios desarrollados en Colombia muestran que el compostaje de biorresiduos de origen municipal (BOM) se caracteriza porque sus sustratos contienen una alta proporción de residuos de alimentos sin procesar (Marmolejo 2011), tales como residuos de frutas y vegetales que presentan una alta humedad que pueden afectar adversamente la porosidad del material y la difusión de oxígeno (Abd El Kader *et al.* 2007, Jolanun *et al.* 2008, Krogmann *et al.* 2010) favoreciendo procesos anaerobios, caídas en el pH, disminución en la tasa de degradación, generación de olores y baja calidad del producto (Díaz y Savage 2007, Sundberg y Jonsson 2008, Guo *et al.* 2012).

En instalaciones de compostaje que tratan sustratos con una alta humedad y que son de rápida degradación como los residuos de alimentos, se requiere una cuidadosa selección de tecnología y mayores controles operacionales (Krogmann *et al.* 2010); en este tipo de instalaciones se han establecido estrategias para el control de la humedad, tales como la incorporación de materiales de soporte y el incremento en la tasa de aireación (Epstein 2011). Con respecto a la incorporación de materiales de soporte, éstos son aplicados para suministrar porosidad a la materia prima y soporte estructural para mejorar la aireación (Haug 1993, Díaz y Savage 2007, Epstein 2011); no obstante, la disponibilidad de los materiales puede ser limitada o incrementar los costos de adquisición y transporte, por lo que deben ser estrictamente seleccionadas (Adhikari *et al.* 2009).

De otro lado, la aireación influye en la eficiencia del proceso y es uno de los parámetros más importantes para ser optimizados, debido a su efecto sobre las tasas de degradación y maduración (Tiquia 2010). La selección del método de aireación depende de la naturaleza del sustrato, siendo los métodos más comunes,

el volteo de pilas (o hileras) o la aireación forzada; ambos tipos han demostrado ser adecuados para un amplio rango de sustratos (Cayuela *et al.* 2006). Díaz y Savage (2007) mencionan que la aireación, además de suministrar oxígeno a la masa de compostaje, sirve para el adecuado control de la humedad, encontrándose las mayores pérdidas de agua en la aireación por volteos (Epstein 2011).

En sistemas de compostaje de BOM a pequeña escala de países en desarrollo se requiere la instalación de tecnologías apropiadas al contexto, tales como aireación con volteos de pilas o aireación forzada (OPS *et al.* 2010); Kalamdhad y Kazmi (2009) indican que los volteos tienen la ventaja de exponer el material fresco a la colonización microbiana, conducen a la liberación de NH_3 retenido en las pilas y cuando se aumentan las frecuencias de volteo durante el proceso, se acorta el período de estabilización activa. No obstante, una mayor frecuencia de volteo requiere una labor intensiva (Getahun *et al.* 2012), por lo que es necesario establecer un régimen apropiado de volteos para conseguir un proceso efectivo.

Dadas la alta humedad de los sustratos del compostaje de BOM en países en desarrollo, la necesidad de identificar medidas de operación que permitan controlar el exceso del contenido inicial de la humedad en el proceso de compostaje y el reconocido rol que tiene la frecuencia de volteo para su reducción (Golueke y McGauhey 1953), este artículo muestra los resultados de la evaluación de la influencia de la frecuencia de volteo en el comportamiento de variables fisicoquímicas del proceso de compostaje de BOM (temperatura, pH y humedad), así como en variables de calidad del producto, con el objetivo de contribuir al mejoramiento del funcionamiento de los sistemas de compostaje de BOM de pequeña escala en el contexto de países en desarrollo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en el municipio de Versalles, Departamento de Valle del Cauca (Colombia). El

municipio se encuentra a una altitud de 1860 msnm y en el estudio presentó una temperatura ambiente promedio de $18.9^{\circ}\text{C} \pm 1.4^{\circ}\text{C}$. Los sustratos empleados en el estudio provienen de los BOM separados en la fuente, recolectados selectivamente por la empresa de aseo y transportados a la planta de compostaje. Estos sustratos estuvieron almacenados por cuatro días en las viviendas, antes de ser recolectados.

Se montaron dos tipos de pilas a escala piloto con diferente frecuencia de volteo durante las cuatro primeras semanas del proceso; la pila A con al menos dos volteos semanales y la pila B con seis volteos semanales. Posterior a las cuatro semanas, se realizó al menos un volteo por semana para ambos tipos de pilas. El volteo fue realizado manualmente, siguiendo las recomendaciones indicadas por Dulac (2001). Previo al montaje, se extrajeron materiales no degradables y los sustratos fueron triturados manualmente, alcanzando tamaños de partícula entre 5 y 7 cm. Las pilas tuvieron un tamaño de 570 kg y se conformaron de forma cónica, con altura entre 0.8 y 1.0 m y se ubicaron en iguales condiciones ambientales, en un espacio cubierto. Se determinó la composición física de los sustratos, clasificándolos en: i) alimentos procesados, ii) alimentos sin procesar, iii) papel y cartón, iv) residuos de poda y jardín y v) impurezas. El experimento consideró montajes previos desarrollados bajo condiciones controladas por los autores (Marmolejo *et al.* 2010, Marmolejo 2011), en los que se han incluido tres réplicas por tratamiento y se ha encontrado un comportamiento y valores similares para los parámetros en cada unidad experimental.

Durante el proceso la temperatura fue medida diariamente en el centroide de la pila; la medición se realizó con un termómetro de carátula de 70 cm. El pH y la humedad se midieron diariamente durante la primera semana del proceso y posteriormente al menos tres veces por semana; para la medición de estas variables se tomó una muestra representativa de 200 g proveniente de cuatro puntos opuestos de cada pila que luego eran integrados (Sullivan y Miller 2001). La medición del pH se realizó utilizando el método potenciométrico, con un pHmetro WTW Modelo 315i, empleando agua destilada y material a analizar en una relación 5:1 (v/v). Para la humedad se empleó un analizador de humedad Ohaus MB-35. El contenido de humedad de las pilas se mantuvo por encima del 30 % mediante la humectación con agua del acueducto municipal. Con la información recopilada se llevó a cabo un análisis descriptivo del comportamiento de la temperatura, la humedad y el pH relacionándolos con las condiciones operacionales de las pilas.

Una vez concluido el período de monitoreo, se tomaron cinco submuestras de cada unidad experimental que luego fueron integradas para obtener una muestra representativa de cada pila; este procedimiento se efectuó siguiendo lo establecido por Sullivan y Miller (2001). Posteriormente se realizaron análisis de pH, humedad, potasio total (K), fósforo total (P) y carbono orgánico oxidable total (COT) siguiendo los métodos expuestos en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 (ICONTEC 2003), y el nitrógeno total (N_{Total}) conforme a lo indicado en la NTC 370 (ICONTEC 1997). Los análisis de cada una de las muestras fueron realizados por duplicado; en caso de que se presentaran coeficientes de variación (CV) mayores a 15 % para algún parámetro, se repetían nuevamente los análisis. La información de calidad del producto se comparó con los estándares de calidad de la Norma Técnica Colombiana (NTC 5167) y se contrastó con los resultados presentados en otros estudios relacionados. Adicionalmente, se determinó la conductividad eléctrica (CE) y el índice de germinación (IG) del producto; la CE se realizó por el método potenciométrico con un conductímetro WTW modelo 325 y los ensayos de germinación se efectuaron determinando la sensibilidad del rabanito (*Raphanus sativus*) a los productos y siguiendo los procedimientos establecidos en la INN (2004) y Varnero *et al.* (2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición física y calidad de sustratos

Los BOM presentaron un predominio de alimentos sin procesar (95 %), seguidos en su orden por alimentos procesados (2.8 %), restos de poda y jardín (1.4 %), impropios (0.5 %) y residuos de papel y cartón (0.4 %). Esta tendencia ha sido reportada previamente en estudios desarrollados en la localidad (Marmolejo 2011). Con respecto a los alimentos sin procesar, predominan cáscaras de frutas y vegetales, entre las que se encuentran en mayor proporción las de plátano, yuca, naranja, maracuyá, cebolla, aguacate, frijol y mazorca; este tipo de residuos se caracterizan por tener materia orgánica de fácil degradación (Krogmann *et al.* 2010). El **cuadro I** presenta los análisis fisicoquímicos realizados a los sustratos de la localidad.

La humedad presenta valores superiores al rango superior recomendado por diversos autores para el inicio del proceso (55 - 65 %) (Stentiford 1996, Chiumenti *et al.* 2005); el alto valor está asociado a la presencia de residuos de frutas y vegetales (Epstein

CUADRO I. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS SUSTRATOS DEL PROCESO

Variable	Unidades	Promedio	Rango	CV
Humedad ¹	%	72.14	--	--
pH ¹	Unidades	4.57	--	--
COT ^{2,3}	%	30.3 ± 2.9	[24.9 – 35.4]	9.5 %
N Total ^{2,3}	%	1.7 ± 0.6	[1.2 – 3.4]	35.2 %
C/N	--	19.3 ± 4.5	[10.4 – 25.9]	23.3 %
K ^{2,3}	%	1.7 ± 0.3	[1.1 – 2.7]	18.8 %
P ^{2,3}	%	0.24 ± 0.1	[0.11– 0.43]	39.6 %

Nota: ¹ Medidos en los sustratos procesados; ² Muestras en base seca (b.s.), ³ Procesamiento estadístico de 24 muestras

2011) el cual puede tener un efecto en el arranque del proceso de compostaje.

Los sustratos del proceso se caracterizan por presentar un pH ácido, bajos contenidos de COT y P_{Total}, así como una relación C/N fuera del rango recomendado por diversas fuentes (Agnew y Leonard 2001, Díaz y Savage 2007, Stentiford y de Bertoldi 2010) para el inicio del proceso de compostaje. El N_{Total} presenta valores típicos para BOM (Krogmann *et al.* 2010, Epstein 2011) mientras que el alto contenido de K reportado para estos sustratos está asociado con la significativa presencia de residuos de cáscaras de plátano, reportada también en otros estudios (Kalemelawa *et al.* 2012).

Comportamiento de la temperatura, humedad y pH

Temperatura y humedad. La **figura 1** presenta el comportamiento de la temperatura (líneas continuas)

y de la humedad en las unidades estudiadas (líneas discontinuas). De igual manera, se observa en la parte inferior de la figura, tanto los volteos manuales efectuados como las ocasiones en las que fue necesario humectar ambos tipos de pilas. Los volteos y las humectaciones tienen una representación del momento en que fueron realizadas en la escala de tiempo planteada y no tienen significado en los ejes de las ordenadas.

En general se observa un comportamiento típico de temperatura del proceso de compostaje, con fases secuenciales mesofílica (< 45 °C), termofílica (> 45 °C), enfriamiento (o segunda mesofílica) y maduración (T ambiente) (Chiumenti *et al.* 2005). La pila B alcanzó en menor tiempo tanto la temperatura del rango termofílico (2 días) como la del mayor pico (12 días) en comparación con la pila A que presentó 3 y 16 días respectivamente. Estos resultados guardan similitud con lo indicado por Tiquia *et al.* (2002), quienes encontraron en el compostaje de estiércol porcino un menor tiempo de duración de la fase termofílica en las pilas con volteo que en las pilas estáticas.

La duración total de las fases mesofílica y termofílica fue dos días menor en la Pila B que en la A, resultado similar al reportado en el compostaje de diferentes sustratos por Jiang *et al.* (2011) (residuos de estiércol porcino y tallos de maíz) y por de Guardia *et al.* (2008) (mezcla de virutas de madera y lodos), quienes mencionan que la temperatura incrementa y decrece más rápido a mayores tasas de aireación. Guo *et al.* (2012) realizando compostaje con estiércol porcino, encontraron un comportamiento similar e indican que se presenta porque la mayor tasa de

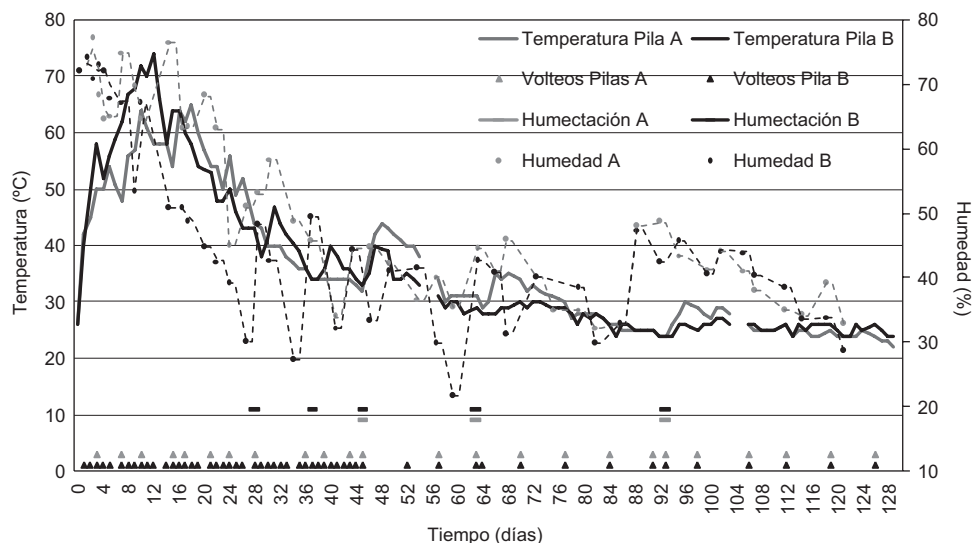


Fig. 1. Comportamiento de la temperatura y la humedad en las unidades estudiadas

aireación conduce a mayor tasa de degradación y pérdidas de humedad y calor.

En ambos casos, el rápido inicio del proceso está relacionado con la presencia de fracciones fácilmente biodegradables en los residuos de alimentos como azúcares, proteínas y aminoácidos (Krogmann *et al.* 2010, Jiang An *et al.* 2012); sin embargo, se observa que el incremento en la frecuencia de la aireación propició mejores condiciones tanto para el suministro de oxígeno como para el manejo de la humedad de los sustratos. Lo encontrado en esta fase coincide con lo planteado por Haug (1993), Smith y Hughes (2004) y Tiquia (2005), quienes indican que mayor aireación por volteo durante la fase inicial de descomposición intensifica la actividad de los microorganismos, acortando el periodo de estabilización activa. Asimismo, puede estar relacionado con el hecho de que los volteos mejoran la homogeneización del sustrato, que permite a los microorganismos transformar material que no habían alcanzado a degradar previamente (Getahun *et al.* 2012).

Con respecto a la humedad, el comportamiento presentado durante las primeras dos semanas muestra una mayor reducción de humedad en la pila B, lo cual está asociado a una mayor tasa de degradación, que se refleja en el mayor calor generado en este periodo y que conduce a la evaporación. Este comportamiento también es reportado por Kalamdhad y Kazmi (2009) en procesos de compostaje a escala de laboratorio empleando estiércol bovino, vegetales y aserrín.

Los mayores picos de temperatura se presentaron en la pila B, que tuvo temperaturas de hasta 74 °C mientras que la pila A alcanzó una temperatura máxima de 64 °C, mostrando la necesidad de un monitoreo cuidadoso para el control de la temperatura en las pilas con mayor aireación. Similares resultados encontraron Abd El Kader *et al.* (2007), quienes concluyen que el volteo, que incrementa la aireación natural, permitió alcanzar las mayores temperaturas del proceso. De otro lado, la pila B tuvo temperaturas mayores a 60 °C por una duración de 11 días mientras que la A por 4 días, lo que permite alcanzar mejores condiciones de higienización, acorde con lo indicado por Krogmann *et al.* (2010). En ambos tipos de pilas, se cumple el rango de temperatura (60 a 70 °C) y tiempo de duración de este rango (24 horas) para la destrucción de patógenos y semillas durante el proceso, como es sugerido por Tchobanoglous *et al.* (1994).

La reducción significativa de la humedad en la etapa termofílica del proceso se extiende desde el día 10 hasta el 28, momento en el cual se necesitó hidratar la pila B con el propósito de mantener la

humedad necesaria para la actividad biológica. Se presentaron oscilaciones continuas en la humedad entre los días 28 y 71, las cuales se asocian con la frecuencia de volteos, pérdida de agua y humectación para mantener el contenido de humedad en los rangos recomendados para el proceso (mayor a 40 %) (Díaz y Savage 2007). Es importante mencionar que durante el proceso se requirió efectuar humectación en cinco oportunidades en la pila B. En contraste, la pila A presentó un descenso menos pronunciado de la humedad, que se manifestó en una menor hidratación (tres veces) y requerimiento de hidratación (32 % de agua requerida por la pila B).

En la fase de enfriamiento se transforman compuestos de difícil degradación y la temperatura decae lentamente (Chiumenti *et al.* 2005, Guo *et al.* 2012), fase que se alcanzó en menor tiempo en la pila B (26 días) en comparación con la pila A (28 días). Esto puede estar asociado a los continuos volteos y humectaciones (tres veces) realizadas en esta fase en la pila B, que mantuvieron un mejor ambiente para la actividad microbiológica. La fase de maduración fue más extendida en la pila B, que presentó una duración de 66 días para alcanzar la temperatura de 24 °C (la menor temperatura obtenida) mientras que la pila A alcanzó la temperatura de 22 °C en 51 días. Esto coincide con lo reportado por Brito *et al.* (2008) quienes concluyen que el volteo incrementa la tasa de mineralización de la materia orgánica, pero después de las cuatro primeras semanas, se presenta una estabilización similar de la materia orgánica en comparación con técnicas de compostaje estático.

pH. La **figura 2** presenta el comportamiento del pH en los dos tipos de unidades estudiadas; las pilas A y B presentan valores similares, situación también reportada por Arslan *et al.* (2011) en su estudio, quienes emplearon diferentes tasas de aireación y no encontraron diferencias en los valores del pH. Desde el inicio del proceso, el pH de ambas pilas presentó valores ácidos hasta el día 2 del proceso; autores como Smårs *et al.* (2002) y Sundberg *et al.* (2004) indican que esta acidez se asocia con la temprana producción de ácidos grasos, que es producto de la descomposición microbiana de la materia orgánica fácilmente degradable (de Bertoldi *et al.* 1983, Chiumenti *et al.* 2005,).

Desde el día 4 hasta finalizar el proceso, el pH presentó valores en el rango alcalino. Bech-friis *et al.* (2001) indican que la descomposición de ácidos orgánicos es seguida por un rápido incremento en el pH causado por la transformación de nitrógeno orgánico

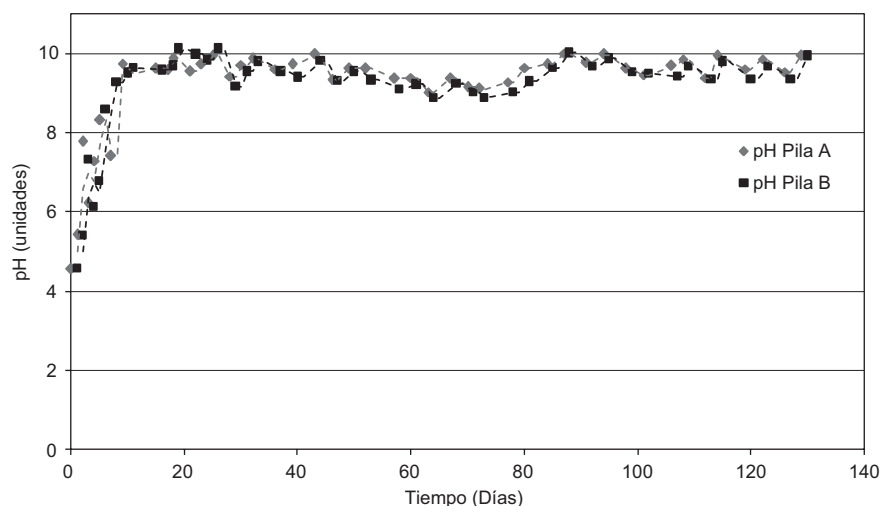


Fig. 2. Comportamiento del pH en las unidades estudiadas

en nitrógeno amoniacal, situación que debe ser controlada ya que el incremento en el pH, asociado con altas temperaturas, puede promover la volatilización del NH_3 (de Bertoldi *et al.* 1983); adicionalmente, las mayores frecuencias de volteo pueden incrementar dichas pérdidas (Guo *et al.* 2012). Otros elementos que contribuyen al incremento del pH son la liberación de CO_2 , la aireación de la biomasa (Haug 1993) y el aumento en la concentración de bases catiónicas solubles en agua causadas por la descomposición de la materia orgánica (Kalemelawa *et al.* 2012).

Los elevados valores alcalinos en ambos tipos de pilas se deben probablemente al gran contenido de potasio que caracteriza a estos sustratos y que está asociado a la alta presencia de cáscaras de plátano en los BOM. De acuerdo con Kalemelawa *et al.* (2012) el ion potasio disponible en forma soluble en agua, combinado con ácidos bicarbonatos (HCO_3) producidos durante la mineralización de la materia orgánica,

puede formar una base fuerte como el hidróxido de potasio (KOH). En este caso, la frecuencia en la aireación no tuvo un efecto en la disminución de los elevados valores de pH encontrados en las fases de enfriamiento y maduración. Estos valores básicos en el producto final se han reportado en estudios previos desarrollados por los autores Marmolejo (2011) y Marmolejo *et al.* (2010). Brito *et al.* (2008) recomiendan que los productos con valores de pH básicos pueden ser mezclados con otros materiales de pH bajos, de manera que puedan ser aplicados en diferentes usos.

Calidad del producto

El **cuadro II** presenta los resultados de calidad de los productos de las pilas A y B. Con respecto a la humedad, los productos alcanzaron valores que cumplen con lo establecido en la norma colombiana para este parámetro. Se observan valores similares

CUADRO II. CALIDAD DE LOS PRODUCTOS FINALES EN LAS PILAS A Y B

Parámetro	Unidades	A	CV _A	B	CV _B	NTC 5167
Humedad ¹	%(m/m)	21.00	2.70	22.00	5.60	≤ 35
pH	Unidades	9.81	--	9.80	--	> 4 y < 9
COT ¹	%(m/m)	9.59	6.73	8.62	0.56	> 15
N _{total} ¹	%(m/m)	1.38	7.10	1.27	1.34	> 1 ³
C/N ¹	--	6.95	--	6.79	--	--
K ¹	%(m/m)	2.62	6.00	1.94	9.50	> 1 ³
P ¹	%(m/m)	0.27	6.79	0.21	6.03	> 1 ³
CE	dS/m	4.81	--	4.21	--	--
IG ²	%	28.8	4.87	39.5	30.54	--

Nota: Muestras en base seca (b.s.); CV: Coeficiente de variación; ¹ n = 2 muestras; ² n = 3 muestras; ³ valor mínimo de reporte

en ambos tipos de pilas, aunque fue necesaria una mayor hidratación en la pila B para mantener el nivel de humedad necesario para la actividad biológica. Para el caso de la humedad y el pH no se presentaron diferencias importantes entre los productos, situación similar a la reportada por Tirado y Michel (2010) quienes indican, en el compostaje de estiércol bovino, que no se presentaron diferencias significativas asociadas a la frecuencia de volteo para ambos parámetros.

Las principales diferencias observadas entre los productos de los dos tipos de pilas, son en el contenido de N, K, P y COT, encontrándose menores valores en la pila B. En relación con el menor contenido de N_{total} en la pila B, otros autores (Tiquia *et al.* 2002, Getahun *et al.* 2012, Guo *et al.* 2012) también reportan menores valores cuando se aumenta la frecuencia de los volteos de las pilas de compostaje, debido a la liberación del NH_3 . Esto sucede debido a que la mayor aireación aumenta la transformación de NH_3 acuoso a NH_3 gaseoso el cual, debido a la alta temperatura y pH, puede ser volatilizado durante los volteos. A pesar de una mayor pérdida de N en la pila B, ambos productos cumplen con los valores mínimos de reporte para este parámetro estipulados en la norma colombiana.

El impacto de la pérdida de N en pilas con mayor frecuencia de volteo no fue significativo en este experimento, debido al contenido inicial del N en los sustratos; no obstante cuando este contenido es bajo, puede incidir negativamente en la calidad del producto final, disminuyendo su valor agronómico. Abd El Kader *et al.* (2007) recomiendan considerar la relación C/N de los sustratos para la programación de la aireación, de manera que se minimicen las pérdidas cuando la relación no es la recomendada para el inicio del proceso.

Los menores valores en COT y P_{Total} en la pila B pueden asociarse a una mayor mineralización de estos elementos, debido a la disponibilidad de oxígeno en el medio que permitió más actividad biológica. En este estudio, ninguno de los dos parámetros en ambos tipos de pilas cumple con los valores mínimos de reporte de la norma técnica, lo que está asociado al bajo contenido del COT y P_{Total} en los sustratos procesados. Tiquia *et al.* (2002) también encontraron en el compostaje de estiércol bovino, menores valores de COT, P_{Total} y K_{Total} en los tratamientos que incluían mayores frecuencias de volteo de las pilas. La relación C/N presentó valores bajos e inferiores a los recomendados por diversos autores (Barberis y Nappi 1996, Sullivan y Miller 2001), lo que está asociado al bajo contenido de COT encontrado en

los productos; estos bajos valores en la C/N pueden causar toxicidad a las plantas por la liberación de amonio (Tiquia 2010).

La CE es una medida indirecta del contenido de sales asociada a la presencia de sodio, cloruro, potasio, nitrato, sulfato y sales de amonio, que en elevadas concentraciones son tóxicas para las plantas e inhiben su crecimiento (Hargreaves *et al.* 2008, Sullivan y Miller 2001). En esta evaluación se encontró que la pila B presentó menor valor, lo cual puede estar asociado a una mayor liberación de sales minerales y de iones de amonio (volatilización del amoniaco) a través de la descomposición de la materia orgánica; sin embargo, ninguno de los dos productos presentó valores inferiores a los rangos recomendados por Koivula *et al.* (2004) (4 dS/m), Dinambro *et al.* (2006) (< 2 dS/m), Benito *et al.* (2006) (< 0.5 dS/m) o Getahun *et al.* (2012) (< 3 dS/m) para su uso en la agricultura. Como indica Tiquia (2010) la salinidad puede estar asociada al relativo alto contenido de nitrógeno en el producto final y su posterior mineralización.

El IG corrobora lo encontrado con la CE, en el que aunque se tuvieron altos porcentajes de germinación en los productos de ambos tipos de pilas (Porcentajes de Germinación Relativa – PGR de 88,9 % y 100 % para los productos A y B respectivamente), tuvieron un bajo crecimiento de la raíz (Crecimiento de Radícula Relativo – CRR de 32,8 y 39,1 para los productos A y B respectivamente). Los valores finales del IG muestran mejores condiciones en el producto B, aunque en ambos productos se percibe fitotoxicidad, lo cual puede indicar la necesidad de mayores periodos de maduración. Tal como lo reportan Smith y Hughes (2004) la alta salinidad del compost puede ser una razón para los bajos rendimientos en el IG y la cual fue corroborada con los valores encontrados de CE en los productos.

CONCLUSIONES

El estudio mostró que el incremento en la frecuencia de volteo de las pilas de compostaje de BOM permitió mejores condiciones de proceso que se reflejó en las mayores tasas de degradación de la materia orgánica, una disminución en la duración de las fases mesofílica, termofílica y de enfriamiento del proceso en un 80 % y en un mayor mantenimiento de las temperaturas de higienización. Sin embargo, el incremento en la frecuencia de volteos tuvo un impacto en la calidad del producto, disminuyendo el contenido de COT y nutrientes (N, P

y K) lo cual puede estar asociado con una mayor mineralización del COT y del N y P orgánicos, así como una mayor pérdida del N por su volatilización como NH_3 . Aunque no se percibieron influencias en el comportamiento del pH del proceso ni del producto, el incremento de la aireación tuvo un efecto favorable en la disminución de sustancias fitotóxicas que se reflejó en un mejor índice de germinación y en menores valores de conductividad eléctrica.

Los resultados de este estudio muestran que el incremento en la frecuencia del volteo de las pilas de compostaje de biorresiduos es efectivo para el control de la humedad inicial de los sustratos y se recomienda efectuar en las fases mesofílica y termofílica (tres primeras semanas en este estudio); adicionalmente, podría combinarse con otras estrategias, como la incorporación de materiales de soporte, que además de contribuir a mejorar la porosidad del material y las condiciones de aireación del material, incrementen el contenido de carbono de los sustratos y ayuden a minimizar las pérdidas de Nitrógeno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Valle (Colombia) por la financiación del proyecto de investigación en el marco del cual se efectuó este estudio; a la Cooperativa de Servicios Públicos de Versalles, Camino Verde APC, por el apoyo brindado en el trabajo experimental. E. R. Oviedo-Ocaña agradece al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia – COLCIENCIAS por la beca otorgada para sus estudios doctorales y a la Universidad Industrial de Santander (Colombia) por el tiempo otorgado para la escritura del artículo.

REFERENCIAS

- Adhikari B.K., Barrington S., Martinez J. y King S. (2009). Effectiveness of three bulking agents for food waste composting. *Waste Manage.* 29, 197-203.
- Agnew J.M. y Leonard J.J. (2003). The physical properties of compost. *Compost Sci. Util.* 11, 238-264.
- Arslan E.I., Unlu A. y Topal M. (2011). Determination of the effect of aeration rate on composting of vegetable–fruit wastes. *Clean-Soil Air Water* 39, 1014-1021.
- Barberis R. y Nappi P. (1996). Evaluation of compost stability. En: European Commission. *Memorias. International Symposium 1996* (M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes y T. Papi, Eds.). The Science of Composting. Chapman & Hall, Glasgow, pp 175-184.
- Beck-Friis B., Smars S., Jönsson H. y Kirchmann H. (2001). Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes. *J. Agr. Eng. Res.* 78, 423-430.
- Benito M., Masaguer A., Moliner A. y de Antonio R. (2006). Chemical and physical properties of pruning waste compost and their seasonal variability. *Biore-source Technol.* 97, 2071-2076.
- Brito L.M., Coutinho J. y Smith S.R. (2008). Methods to improve the composting process of the solid fraction of dairy cattle slurry. *Biore-source Technol.* 99, 8955-8960.
- Cayuela M.L., Sánchez-Monedero M.A. y Roig A. (2006). Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes. *Process. Biochem.* 41, 616-623.
- Chiumenti A., Chiumenti R., Diaz L.F., Savage G., Eggerth L. y Goldstein N. (2005). Modern composting technologies. *Biocycle. Journal of Composting Organics Recycling.* Singapore, 96 pp.
- De Bertoldi M., Vallini G. y Pera A. (1983). The biology of composting: A review. *Waste Manage Res.* 1, 157-176.
- De Guardia A., Mallard P., Teglia C., Marin A., Le Pape, C., Launay M., Benoist J.C. y Petiot C. (2010). Comparison of five organic wastes regarding their behaviour during composting: Part 2, nitrogen dynamic. *Waste Manage.* 30, 415-425.
- De Guardia A., Petiot C., Rogeau D. y Druilhe C. (2008). Influence of aeration rate on nitrogen dynamics during composting. *Waste Manage.* 28, 575-587.
- Diaz L.F., Savage G.M., Eggerth L. y Chiumenti A. (2007). Systems used in composting. En: *Compost Science and Technology* (L.F. Diaz, M. de Bertoldi, W. Bidlingmaier y E. Stentiford, Eds.). Waste Management Series 8, Elsevier, Amsterdam, pp. 67-87.
- Dimambro M.E., Lillywhite R.D. y Rahn C.R. (2006). Biodegradable municipal waste composts: analysis and application to agriculture. Warwick HRI, University of Warwick [en línea]. <http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/whri/research/nitrogenandenvironment/summary/dimambro2006.pdf>.
- Dulac N. (2001). The organic waste flow in integrated sustainable waste management – The concept. *Waste. Tools for decision-makers: Experiences from the Urban Waste Expertise Programme (1995-2001)*. Waste, Netherlands. 49 pp.
- Epstein E. (2011). *Industrial composting: Environmental engineering and facilities management*. CRC. Taylor & Francis Group. Press. Boca Raton, EUA. 314 pp.
- El Kader N. A., Robin P., Paillat J.-M. y Leterme P. (2007). Turning, compacting and the addition of water as

- factors affecting gaseous emissions in farm manure composting. *Bioresource Technol.* 98, 2619-2628.
- Getahun T., Nigusie A., Entele T., Gerven T. V. y Van der Bruggen B. (2012). Effect of turning frequencies on composting biodegradable municipal solid waste quality. *Resour. Conserv. Recy.* 65, 79-84.
- Golueke C.G y McGaukey P.H. (1953). Reclamation of municipal refuse by composting. Technical Bulletin 9. Sanitary Engineering Reserch Laboratory, University of California, 89 pp.
- Guo R., Li G., Jiang T., Schuchardt F., Chen T., Zhao Y. y Yujun Y. (2012). Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technol.* 112, 171-178.
- Hargreaves J.C., Adl M.S. y Warman P.R. (2008). A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agr. Ecosyst. Environ.* 123, 1-14.
- Haug R.T. (1993). The practical handbook of compost engineering. Lewis Publishers, Boca Raton, EUA. 334 pp.
- ICONTEC (1997). Norma Técnica Colombiana NTC 370. Abonos o fertilizantes. Determinación de nitrógeno total. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Bogotá, D.C. 9 pp.
- ICONTEC (2003). Norma Técnica Colombiana NTC 5167. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Bogotá DC. 43 pp.
- INN (2004). Norma chilena de compost 2880- 2004 (NCh 2880-2004), Compost - Clasificación y requisitos, 23. Instituto Nacional de Normalización. Santiago de Chile. 27 pp.
- Jiang T., Schuchardt F., Li G., Guo R. y Zhao Y. (2011). Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting. *J. Environ. Sci.* 23, 1754-1760.
- Jolanun B., Towprayoon S. y Chiemchaisri C. (2008). Aeration improvement in fed batch composting of vegetable and fruit wastes. *Environ. Prog.* 27, 250-256.
- Kalamdhad A. S. y Kazmi A.A. (2009). Effects of turning frequency on compost stability and some chemical characteristics in a rotary drum composter. *Chemosphere* 74, 1327-1334.
- Kalemelawa F., Nishihara E., Endo T., Rumana Yeasmin Z.A., Moses M. y Tenywa S.Y. (2012). An evaluation of aerobic and anaerobic composting of banana peels treated with different inoculums for soil nutrient replenishment. *Bioresource Technol.* 136, 375-382.
- Koivula N., Räikkönen T., Urpilainen S., Ranta J. y Hänninen K. (2004). Ash in composting of source-separated catering waste. *Bioresource Technol.* 93, 291-299.
- Krogmann U., Körner I. y Diaz L.F. (2010). Composting: Technology. En: *Solid waste technology & management* (T. H. Christensen, Ed.). Wiley, Malaysia, pp 533-568.
- Marmolejo L.F., Oviedo R., Jaimes J. y Torres P. (2010). Influencia de la separación en la fuente sobre el compostaje de residuos sólidos municipales. *Revista Agronómica de la Universidad Nacional* 28, 319-328.
- Marmolejo L.F. (2011). Marco conceptual para la sostenibilidad de los sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos en cabeceras municipales menores a 20.000 habitantes del Valle del Cauca. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle. Cali, Colombia, 205 pp.
- Smars S., Gustafsson L., Beck-Friis B. y Jönsson H. (2002). Improvement of the composting time for household waste during an initial low pH phase by mesophilic temperature control. *Bioresource Technol.* 84, 237-241.
- Smith D.C. y Hughes J.C. (2004). Changes in maturity indicators during the degradation of organic wastes subjected to simple composting procedures. *Biol. Fertil. Soils* 39, 280-286.
- Stentiford E. (1996). Composting control: principles and practice. En: *European Commission. Memorias. International symposium 1996* (M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes y T. Papi, Eds.). The Science of Composting. Chapman & Hall, Glasgow, pp 49-59.
- Sullivan D.M. y Miller R.O. (2001). Compost quality attributes, measurements, and variability. En: *Compost utilization in horticultural cropping systems* (P.J. Stoffella y B.A. Kahn, Eds.). CRC Press, Boca Raton, Florida, 95-120 pp.
- Sundberg C. y Jönsson H. (2008). Higher pH and faster decomposition in biowaste composting by increased aeration. *Waste Manage.* 28, 518-526.
- Sundberg C., Smårs S. y Jönsson H. (2004). Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Bioresource Technol.* 95, 145-150.
- Tchobanoglous G., Theisen H. y Vigil S. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos*. McGraw-Hill, Madrid, 1107 pp.
- OPS, BID y AIDIS (2010). Informe Regional del Proyecto Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010. Organización Panamericana de la Salud, BID – Banco Interamericano de Desarrollo y AIDIS - Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Washington, DC. 156 pp.
- Tirado S.M. y Michel F.C. (2010). Effects of turning frequency, windrow size and season on the production of dairy manure / sawdust composts. *Compost Sci. Util.* 18, 70-80.

- Tiquia S.M., Richard T.L. y Honeyman M.S. (2002). Carbon, nutrient, and mass loss during composting. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 62, 15-24.
- Tiquia S.M. (2005). Microbiological parameters as indicators of compost maturity. *J. Appl. Microbiol.* 99, 816-828.
- Tiquia S.M. (2010). Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition. *Chemosphere* 79, 506-512.
- Varnero M.T., Rojas A.C. y Orellana R.R. (2007). Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Rev. Cienc. Suelo Nutr.* 7, 28-37.