

Evaluación de la adecuación de humedad en el compostaje de biorresiduos de origen municipal en la Planta de Manejo de Residuos Sólidos (PMRS) del Municipio de Versalles, Valle del Cauca

Assessment of the adequacy of moisture in the municipal biowaste composting origin Solid Waste Management Plant (SWMP) in the municipality of Versalles, Valle del Cauca

**Gustavo Castro García¹, Martha Constanza Daza Torres²
y Luís Fernando Marmolejo Rebellón³**

Fecha de recepción: 29 de octubre de 2015

Aceptación: 2 de junio de 2016

Recibido versión final: 2 de junio de 2016

Resumen

El aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos de origen municipal (biorresiduos), es una atractiva opción para la obtención de materiales aptos para su aplicación en suelo como fuente de materia orgánica. Sin embargo, en Colombia, esta tecnología presenta deficiencias en su ejecución en plantas de manejo de residuos sólidos (PMRS). Una de las principales limitantes en el compostaje de biorresiduos es el alto contenido de humedad inicial en las materias primas. En este artículo se presenta los resultados del compostaje de biorresiduos separados en la fuente, en donde se evaluó la incorporación de compost maduro para el control de la humedad de la mezcla, observando como interactuó con el proceso,

1. Ingeniero Agrícola, M.Sc. Profesor Asistente, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de La Salle, Sede Utopía Yopal – Casanare. Colombia. Email: gcastrog@unisalle.edu.co

2. Ingeniera Agrícola, M.Sc. Profesora Asociada, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali – Colombia. Email: martha.daza@correounivalle.edu.co

3. Ingeniero Sanitario, M.Sc. Ph.D. Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali – Colombia. Email: luis.marmolejo@correounivalle.edu.co

y su relación con las principales variables ambientales del compostaje, como los son la temperatura, pH, humedad, porosidad y espacio libre de aire (ELA).

Palabras Claves

Compostaje, biorresiduos, porosidad, residuos sólidos urbanos (RSU)

Abstract

The use of organic municipal solid waste (biowaste) is an attractive option for obtaining material suitable for land application as a source of organic matter. However, in Colombia, this technology has weaknesses in its implementation in solid waste management plants (SWMP). One of the main limitations in biowaste composting is the high initial moisture content in the raw materials. This article presents the results of composting separate biowaste occurs at the source, where the incorporation of mature compost to control the humidity of the mixture was evaluated, watching interacted with the process and its relationship with key environmental variables composting, as are the temperature, pH, moisture, porosity and free air space (FAS).

Key words

Composting, biowaste, porosity, urban solid waste (USW)

Introducción

La fracción orgánica de residuos sólidos de origen municipal es conocida como biorresiduos (Adhikari *et al.* 2008), los cuales pueden ser tratados por medio de un proceso de compostaje, obteniendo un producto orgánico denominado compost, el cual puede ser comercializado como fuente de materia orgánica para el suelo, constituyéndose en una alternativa económica y ambientalmente viable (Flotats y Campos, 2001). En Colombia la Política Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos, establece que el aprovechamiento de estos materiales es un componente importante en el marco de desarrollo ambiental para el país. Sin embargo, se ha evidenciado que el compostaje de biorresiduos en Colombia, presenta deficiencias de funcionamiento, puesto que los procesos no son adecuados y se obtienen productos que no cumplen con los criterios de calidad para ser aplicados al suelo (SSPD, 2008) y

pueden representar un riesgo para la productividad y la salud pública (Domingo y Nadal, 2009).

En las plantas de manejo de residuos sólidos (PMRS) locales, se estima que cerca del 65% del material corresponde a biorresiduos (Marmolejo *et al.* 2012). A pesar de ello es necesario establecer tratamientos con la incorporación de materiales estructurantes o que permitan adecuar la humedad inicial (Oviedo, 2010). Esto conlleva a la generación de condiciones indeseadas en el proceso de compostaje, como la anaerobiosis, acidificación, putrefacción de la materia orgánica, pérdida de nutrientes y la generación de productos de inadecuada calidad agrícola.

Una alternativa para adecuar tratamientos de compostaje de biorresiduos de origen municipal es la incorporación de materiales que permitan el control de la humedad inicial en la mezcla de compostaje.

Kurola *et al.* 2011 encontraron que al adicionar ceniza en el compostaje de biorresiduos, lograron reducir el contenido de humedad de 61% a 45% mejorando el proceso de compostaje y permitiendo el alcance de temperaturas más altas que lograron la higienización del producto final. Kuba *et al.* (2008) también usaron cenizas como aporte de micronutrientes para mejorar la calidad del producto final y favorecer la actividad microbiana y el alcance de altas temperaturas para la higienización del producto.

Oviedo *et al.* (2013) encontraron que el pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*) usado como material de soporte mejoró el contenido de carbono, pH y el soporte estructural de los biorresiduos logrando alcanzar la etapa termofílica en menor tiempo, incrementando su duración y mejorando parámetros de calidad del producto final. Sin embargo, la posibilidad de usar diversos materiales en el proceso de compostaje es amplia, pero es importante que sean estudiados para establecer sus ventajas y desventajas. El presente trabajo muestra los resultados de la incorporación de compost maduro que ha sido producido y almacenado en las condiciones de funcionamiento de la PMRS de estudio.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló en las instalaciones de la PMRS del Municipio de Versalles, ubicado al noroeste del departamento del Valle del Cauca (latitud 4°, 34', 43"), longitud (76°, 12', 23') a 1860 m.s.n.m. La temperatura promedio 18 °C, máxima de 24 °C y mínima de 12 °C (Versalles.gov, 2012). El municipio de Versalles cuenta con 3.276 habitantes

urbanos y se encuentra ubicado a 220 km de la ciudad de Santiago de Cali. Aproximadamente la PMRS recolecta alrededor de 32 ton/mes de residuos sólidos urbanos (RSU), de los cuales el 69% son biorresiduos (Oviedo, 2010). Durante el proceso se realizó seguimiento periódico de las variables temperatura, pH, humedad y espacio libre del aire.

Se realizó un diseño experimental de bloques completos aleatorizados (DBCA), donde se evaluaron mezclas de biorresiduos con compost maduro estableciendo la humedad inicial en los tratamientos. Este estudio de acondicionamiento de la humedad inicial en compostaje de biorresiduos, no adecuó la relación carbono/nitrógeno (C/N) inicial en la mezclas estudiadas, esta condición obedece a la naturaleza de las materias primas y no como lo establece la literatura entre (25 – 30) (Tchobanoglous *et al.* 1998). Se contó con un tratamiento testigo que consistió en biorresiduos sin adición de compost maduro (Tabla 1). Se realizó caracterización de los materias primas en donde se analizó: carbono orgánico (%), N Total (%), humedad (%), pH, densidad real y densidad aparente; recomendados por la NTC 5167 del 2003 (ICA-ICONTEC, 2003).

El compost maduro consistió en residuos previamente estabilizados y almacenados en la PMRS de estudio, este material fue utilizado por su disponibilidad en la región, humedad inferior a 20% y granulometría entre 1 – 3 cm. El material utilizado se encontraba en condiciones de almacenamiento en costales bajo techo. Las pilas tuvieron un tamaño alrededor de 1 m de base por un 1 m de alto de forma cónica. En la etapa termofílica se realizó volteo

Tabla 1. Tratamientos con biorresiduos y compost maduro

Tratamiento	B (kg)	CM (kg)	Mezcla (kg)	%B	%ME	Humedad inicial (%H)	Relación C/N Inicial
T1	150	0	150	100	0	> 70 %	24
T2	150	41	191	79%	21%	60 %	21
T3	150	111	261	57%	43%	50 %	17

B: Biorresiduo; CM: Compost Maduro. %H: Humedad; C/N: Carbono/Nitrógeno

evitando que la temperatura alcanzara los 70 °C, en la etapa mesofílica se programaron 3 volteos semanales. Los tratamientos fueron ubicados en un invernadero con piso en tierra apisonado y techo de plástico. Se realizó monitoreo de temperatura, humedad, pH y porosidad. La temperatura fue valorada diariamente con termómetro de carátula de 30 x 100 cm y fue tomada en 4 puntos, de forma perimetral a la altura media de la pila. La humedad se determinó con un determinador de Humedad marca Ohaus MB-35, con una frecuencia de tres veces por semana. El pH se determinó con un pH-metro marca WTW, Modelo 315i, en una frecuencia de tres veces por semana. La porosidad se determinó por medio de la relación de la densidad aparente y la densidad real con una frecuencia de una vez por semana. También se realizó la medición de la relación entre el contenido de humedad y el espacio poroso, llamada Espacio Libre del Aire (ELA) se calculó mediante (Shulze, 1962):

$$ELA = \frac{P}{\left(1 - \frac{\%H}{100}\right)} \quad (1)$$

$$P = 100 \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) \quad (2)$$

Dónde:

P: porosidad; H: Humedad; Da: Densidad aparente; Densidad Real: Dr.

Se realizó una caracterización final de los productos obtenidos según la NTC 5167 del 2003 (ICA-ICONTEC, 2003) (Tabla 2):

Resultados

La tabla 3 muestra la caracterización inicial de las materias primas. Esta caracterización se realizó para el compost maduro y para cada pila que conformó el respectivo tratamiento.

Evolución de temperatura

La figura 1 muestra el comportamiento de la temperatura a lo largo del proceso de compostaje. El rápido aumento de la temperatura en los primeros cinco días está relacionado con la proliferación de microorganismos e incremento de su actividad

Tabla 2. Análisis de los productos obtenidos

Parámetro	Método	Unidad
pH	SSLMM-42-2-92	unidades
Humedad	NTC 5167	%
Carbono Orgánico Oxidable Total	NTC 5167	%
Relación C/N	No aplica	-
Nitrógeno Orgánico Total	NTC 370	%
Fósforo total (P ₂ O ₅)	NTC 234	%
Potasio Total (K ₂ O)	NTC 5167	%
Cenizas	NTC 5167	%
Capacidad de intercambio Catiónico (CIC)	NTC 5167	cmol (+) kg ⁻¹
Conductividad Eléctrica (Ces)	SSLMM-42-2-92	dS/m
Capacidad Retención de Agua	NTC 5167	%
Densidad aparente	NTC 5167	g/cm ³

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de las materias primas

Parámetros	Unidad	Compost maduro	Sustrato (T1)	Sustrato (T2)	Sustrato (T3)
pH	unidades	9.34	4.12	4.53	4.99
Humedad	%	23.17	72.57	63.70	63.30
COT	%	12.89	31.21	36.91	32.86)
N Total	%	1.30	1.30	1.40	1.30
Relación C/N	adimensional		24	21	17
Porosidad	%	30	59.02	55.67	50.84

T1: sustrato tratamiento 1. T2: sustrato tratamiento 2. T3: sustrato tratamiento 3.

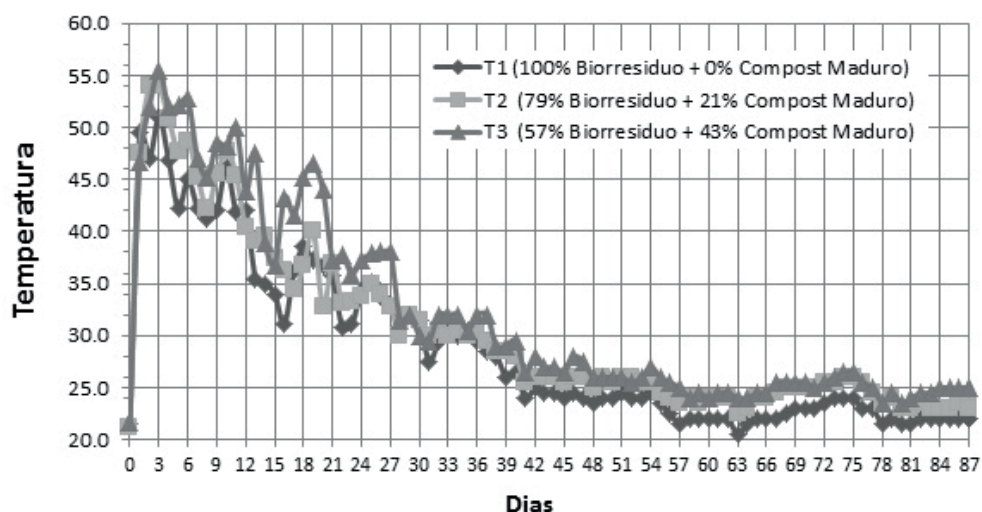


Figura 1. Efecto de la adición de compost maduro en la evolución de la temperatura en el proceso de compostaje de biorresiduos de origen municipal en PMRS del Municipio de Versalles Valle Colombia

(Tortosa, 2011). El tratamiento T3 se comportó con una temperatura superior, seguido del tratamiento T2 y de menor registro T1. La mezcla (57% biorresiduo + 43% compost maduro) alcanzó mayores temperaturas durante el proceso de compostaje. Los descensos abruptos presentados durante el proceso se deben a la humectación y volteo en las pilas. Después del día 60 se aprecia un comportamiento característico de la fase de enfriamiento en todos los tratamientos.

Evolución del pH

La Figura 2 muestra el comportamiento del pH durante el proceso de compostaje. En el intervalo de los 10 primeros días, se observa como el tratamiento testigo T1 inició con valores de pH cercanos a 5, luego alcanza valores de cercanos a 8, lo cual representa valores típicos para los biorresiduos sin ningún tipo de enmienda al inicio del proceso (Herrera *et al.* 2008). De igual manera en los tratamientos con

presencia de compost maduro, el registro de pH comenzó cerca de las 5 unidades. Después del día 10 el comportamiento del pH de todos los tratamientos fue similar, con una tendencia a estabilizarse en valores alrededor de 10 unidades.

Evolución del Espacio Libre de Aire (ELA)

El Espacio Libre de Aire (ELA) es la relación del volumen poroso respecto al volumen total, por lo tanto un ELA insuficiente prolonga el período de transformación y/o enfriamiento del sistema. Los materiales para adecuar la porosidad y humedad

en el compostaje pueden representar hasta el 60% del costo total, y su uso debe ser racional a un nivel que proporciona FAS óptimo y soporte estructural (Annan y White, 1998). Se observó que en todos los tratamientos predominaron valores entre 20 y 30% de ELA (Figura 3). El tratamiento T3, presentó una tendencia mayor respecto a T2 y T1. Sin embargo, se demostró que el compost maduro no brinda una función como material estructurante, lo cual no incrementó el espacio poroso, lo que limita la aireación y el desarrollo del proceso de compostaje, repercutiendo en la calidad de los productos.

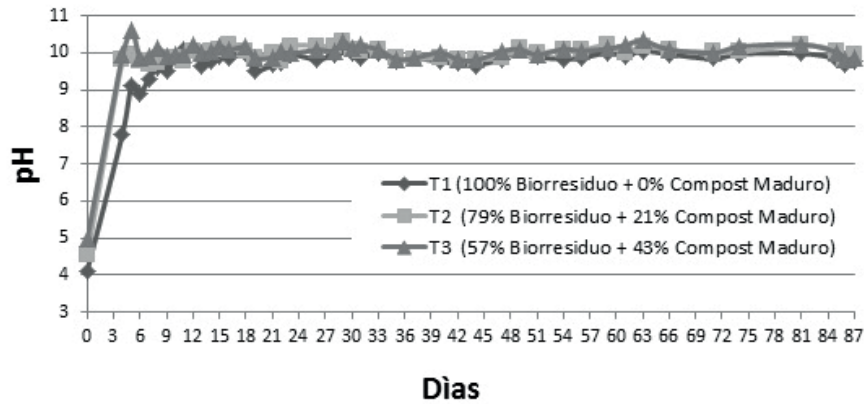


Figura 2. Efecto de la adición de compost maduro en la evolución del pH en el proceso de compostaje de biorresiduos de origen municipal en PMRS del Municipio de Versalles Valle Colombia

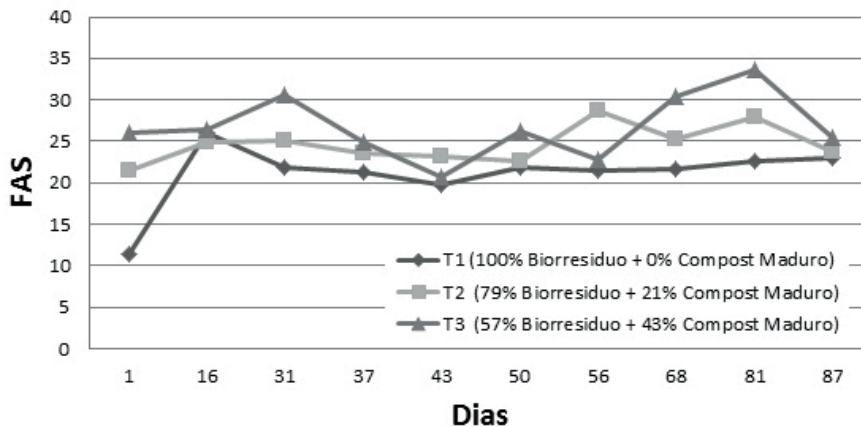


Figura 3. Efecto de la adición de compost maduro en la evolución del ELA en el proceso de compostaje de biorresiduos de origen municipal en PMRS del Municipio de Versalles Valle Colombia

Se encontró que ELA presentó una relación inversamente proporcional (Figura 4) a la humedad, indicando que a mayor valor de humedad (%) se tiene un menor valor de ELA, lo que coincide con lo reportado por Epstein (2011).

Caracterización final de los productos obtenidos

La Tabla 6 muestra los resultados de la caracterización final de los productos obtenidos:

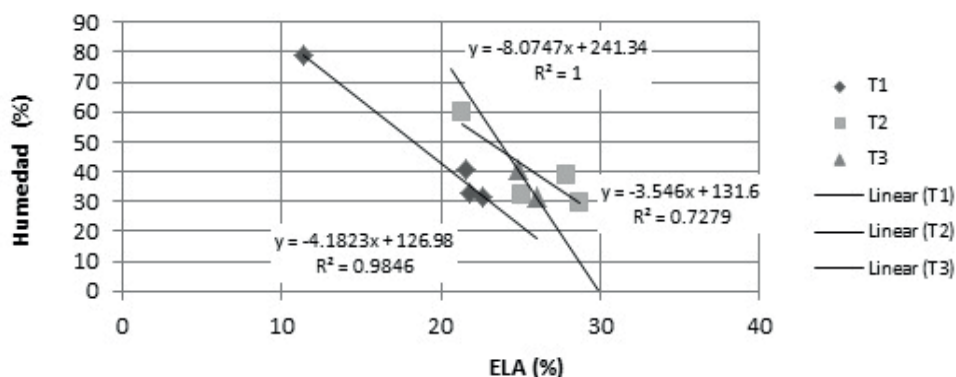


Figura 4. Efecto de la adición de compost maduro en la relación entre ELA y humedad en el en el proceso de compostaje de biorresiduos de origen municipal en PMRS del Municipio de Versalles Valle Colombia

Tabla 6. Caracterización de los productos obtenidos a partir de los diferentes tratamientos estudiados

Parámetro	Método	unidad	T1	T2	T3	NTC 5167 2003
pH	SSLMM-42-2-92	unidades	9.5	9.9	9.9	4 - 9
Humedad	NTC 5167	%	25.6	29.3	29.2	< 35
Carbono Orgánico Oxidable Total	NTC 5167	%	7.6	9.0	8.4	> 15
Relación C/N	No aplica	-	10.7	9.4	7.0	-
Nitrógeno Orgánico Total	NTC 370	%	0.7	0.9	1.2	*
Fósforo total (P ₂ O ₅)	NTC 234	%	0.5	0.48	0.4	*
Potasio Total (K ₂ O)	NTC 5167	%	1.9	2.5	2.2	*
Cenizas	NTC 5167	%	83.0	79.6	75.1	< 60
Capacidad de intercambio Catiónico (CIC)	NTC 5167	meq/100g	35.5	38.0	44.0	> 30
Conductividad Eléctrica (Ces)	SSLMM-42-2-92	dS/m	0.2	0.34	0.4	*
Capacidad Retención de Agua	NTC 5167	%	81.5	92.8	93.1	> 100
Densidad aparente	NTC 5167	g/cm ³	0.7	0.7	0.5	< 0.6

T1: Sin material compost maduro en la mezcla. 100% biorresiduos.

T2: Con compost maduro. Mezcla 79% biorresiduo + 21% compost maduro.

T3: Con compost maduro. Mezcla 57% biorresiduo + 43% compost maduro.

Discusión

Los valores de pH de los sustratos se encontraron en un rango ácido, inferior a 5.0, indicando que los residuos adelantaban un proceso de descomposición, en donde se generan inicialmente ácidos orgánicos con la consecuente disminución del pH (Tchobanoglous *et al.* 1998). Por el contrario, el compost maduro presentó un valor de pH de por encima por lo regulado en la NTC 5167 del 2003, aunque acordes por los encontrados por Déportes *et al.* 1998 para materiales de residuos sólidos municipales. Tognetti *et al.* (2007) obtuvieron en sus ensayos de compostaje con mezclas de residuos orgánicos municipales y virutas de madera valores de pH por encima de 9, lo que muestra que los valores de pH bajos de los residuos sólidos orgánicos se balancean con los valores altos de pH de la viruta de madera. La humedad de los sustratos T1A, T1B (72.57%), T2A, T2B (63.7%) y T3A, T3B (63.30%), se encontró entre 60 – 80%, valores altos dado que para un adecuado proceso de compostaje se recomienda que la humedad inicial se encuentre entre 50 y 60% (Richard *et al.* 2002).

La alta humedad inicial de los residuos puede estar relacionada con las condiciones de almacenamiento y condiciones climatológicas (Huerta *et al.* 2008); una posible razón para que la humedad inicial en los biorresiduos sea alta es porque las materias primas están expuestas al aire libre y absorben humedad del ambiente hasta llegar a un equilibrio con la atmósfera, teniendo en cuenta que el contenido de humedad absoluta en las materias primas varía según la temperatura ambiente (Sánchez, 1996). El Carbono Orgánico Total se encontró dentro de un rango entre 31 – 37%, lo cual presentó valores típicos para estos residuos (Epstein, 2011). Cabe anotar que en estudios locales de residuos separados en la fuente de similares características se han encontrado valores cercanos a los hallados en la presente investigación (Marmolejo *et al.* 2010). El compost maduro presentó un valor de COT de 12,89%, acorde a su estado de descomposición, dado que ha sido sometido previamente a compostaje.

El Nitrógeno Total para todos los sustratos de la mezcla de compostaje osciló entre 1.3 – 1.4%, cercanos para RSM según lo reporta Barral *et al.* (2002) con valores entre 1.5 – 1.7% y a los reportados por Marmolejo *et al.* (2010), para residuos separados en la fuente de similares condiciones de generación local con valores entre 1.05 – 1.65%. Los valores de relación C/N para los sustratos (24:1 para T1, 21:1 para T2 y 17:1 para T3) se encontraron por debajo de lo reportado por la literatura (Dulac, 2001; Barrena, 2006). Seguramente porque los materiales han empezado su descomposición antes de llegar a la PMRS. Zhang *et al.* (2010), realizaron un compostaje de biorresiduos con relaciones C/N iniciales bajas de 9.82, 10.05 y 10.11, y encontraron que este parámetro, no fue un factor limitante para el desarrollo del proceso, alcanzando temperaturas por encima de los 60 °C, y obteniendo productos aptos para su aplicación en el suelo. En un estudio desarrollado por Marmolejo *et al.* (2010), se realizó compostaje de RSM sin separación en la fuente con una relación C/N inicial de 18:1, en donde se lograron alcanzar temperaturas termófilas; pero en el tratamiento con biorresiduos separados en la fuente con una relación C/N de 21:1 inicial, se evidenció una mejor evolución del proceso, alcanzando un gradiente de temperatura mayor.

Con base a las recomendaciones de USEPA (1993), las temperaturas alcanzadas por los diferentes tratamientos no lograron la higienización de los tratamientos, puesto que se recomienda mantener una temperatura superior a los 55 °C durante 3 días consecutivos, aunque esta higienización también depende de la contaminación microbiológica de las materias primas. Los tratamientos con compost maduro alcanzaron mayores temperaturas que las alcanzadas por el testigo; también se observó que a mayor cantidad de compost maduro adicionado, mayor temperatura fue alcanzada durante el proceso de compostaje.

Se observó que la adición de compost maduro para reducir la humedad inicial en las pilas no fue

suficiente para estimular la actividad microbiana en las pilas, teniendo temperaturas por debajo de los 60 °C. Esta situación es debida a que la premisa de controlar la humedad inicial es inadecuada, también se demostró que se requiere de un adecuado balance de la relación C/N inicial en las pilas, lo que hace necesario a la PMRS buscar alternativas para adecuar este parámetro. Generando una actividad adicional para la planta de compostaje de buscar enmiendas con contenidos ricos en carbono que permitan balancear el proceso, y esperar obtener productos de adecuada calidad.

Dado que en las pilas la relación C/N se encuentra por debajo de 30, se genera liberación del ión amonio, haciendo que el pH en las pilas sea alcalino (Herrera *et al.* 2008). Por lo tanto, el intento de adecuar la humedad inicial en este estudio mediante el compost maduro, demuestra que no es suficiente para estimular el adecuado proceso de compostaje, lo que también se generaron procesos de anaerobiosis e incrementando el valor de pH. El efecto de reducir la humedad inicial en las pilas, no mostró un efecto beneficioso en la evolución de pH.

Los descensos en el valor del pH pueden deberse posiblemente a la actividad microbiana y acidificación del medio. Los tratamientos se encontraron principalmente entre 9.5 – 10.5 unidades de pH, lo que favorece la formación de mohos y levaduras (Castrillón *et al.* 2006). Al cabo de 87 días los tratamientos con compost maduro se obtuvieron valores de pH más altos que el testigo. El ELA limita el proceso de compostaje y se recomienda que para los biorresiduos sus valores deben estar cerca del 30% (Haug, 1993). Al establecer la relación entre el ELA y la humedad, se observó que ELA tiene un valor entre 20 – 30%, siendo el tratamiento T2 con los valores más altos para un mismo valor de humedad.

Los valores de pH de los productos obtenidos estuvieron entre 9.5 – 9.9, por encima de los establecido en la NTC 5167. Los biorresiduos se caracterizan por tener altos contenidos de proteínas y al descomponerse pueden incrementar el pH (Chang

y Hsu, 2008) e influye en la liberación de amoníaco (Tchobanoglus *et al.* 1998). La adición del compost maduro no tuvo efecto en el valor final de pH. Los valores de la humedad estuvieron entre 25.6% y 30.4% para todos los tratamientos, cumpliendo con lo establecido por la norma (< 35%).

En cuanto a carbono orgánico oxidable total ninguno de los tratamientos alcanzó el valor recomendado por la NTC 5167, debido a los bajos valores de relación C/N iniciales en todos los tratamientos, lo cual hace que el carbono orgánico se transforme y se libere a la atmósfera en forma de CO₂ por la acción microbiana (Epstein, 2011). Acerca de la relación C/N, aunque la norma no manifiesta un valor límite, en todos los tratamientos esta relación estuvo por debajo de 20, rango típico encontrado en materiales sometidos a compostaje. Cabe mencionar que la aplicación de productos con baja relación C/N al suelo favorecen los procesos de mineralización más que los de inmovilización (Soliva y López, 2004; Tchobanoglus *et al.* 1998).

En el caso de los valores de Nitrógeno Orgánico Total (%), Fósforo (P₂O₅) y Potasio (K₂O), según la norma técnica NTC 5167 en el caso de productos denominados “abono orgánico”, exige que sean reportados si la suma de estos parámetros es superior a 1%, requisito que fue cumplido por todos los tratamientos. Estos resultados encontrados en los productos finales obtenidos hacen que estas enmiendas tengan valor adicional, pues al presentar estos contenidos de nutrientes que son fundamentales para el crecimiento de las plantas, podrían servir de complemento a fertilizantes convencionales reduciendo los costos de producción (DNP, 2009). En los tratamientos con enmienda se reportaron los mayores valores para Nitrógeno Total, esto quiere decir que la enmienda permitió que se redujera la pérdida de este nutriente en forma amoniacal (Epstein, 2011) al controlar el pH y las relaciones de porosidad.

El contenido cenizas en todos los tratamientos estuvieron por encima del 75% por lo que no

cumplieron con lo recomendado por la NTC 5167 (< 60%). El porcentaje de ceniza indican la presencia de sales minerales, en donde el compost de biorresiduos contienen alta concentración debido posiblemente a la presencia de alimentos procesados con contenidos de sal ; estos resultados respaldan a los encontrados en la Conductividad Eléctrica donde tratamientos sin enmienda presentaron los menores valores (Iñiguez *et al.* 2006).

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) hace referencia a la capacidad que tiene un material para retener cationes, y es equivalente a la carga negativa desarrollada en las superficies coloidales (Jaramillo, 2002). Los valores de CIC encontrados estuvieron entre 35.5 y 44 cmol (+) kg⁻¹ para todos los tratamientos los cuales estuvieron por encima del valor recomendado por la norma (> 30%). Durante el compostaje, la CIC se incrementa debido posiblemente a la humificación que se presenta durante la descomposición de materia orgánica de los sustratos. La presencia de compuestos orgánicos permiten la deshidrogenización generando cargas negativas superficiales que logran retener agua y nutrientes. El producto terminado adicionado al ser un material con un proceso avanzado de compostaje presenta compuestos químicos estabilizados que logran aumentar la retención (Jaramillo, 2002).

La conductividad eléctrica (Ces) en los productos obtenidos se encontraron en un rango bajo de 0.24 a 0.38 dS/m; aunque la NTC 5167 no estipula un valor de referencia, es importante considerar este parámetro puesto que relaciona el contenido de sales, que en exceso pueden resultar nocivas para las plantas. Se han reportado valores de aplicaciones de compost provenientes de biorresiduos con valores entre 3.69 – 7.49 dS/m que no han inhibido el crecimiento de las plantas (Hargreaves *et al.* 2008). El compost maduro aumentó la conductividad eléctrica en 29% y 36% para T2 y T3 respectivamente con respecto al testigo.

Sobre la capacidad de retención de agua, los valores más altos se reportaron para los tratamientos T2 y T3, pero sin alcanzar los valores establecidos por la

norma (> 100%). Esto indica que el comportamiento de esta variable no se asemeja a los abonos orgánicos tradicionales. Una posible razón es que las materias primas no fueron acondicionadas con una picadora, lo que no permitió desarrollar una textura de los productos finales que pudieran retener mayor la humedad. Para la densidad aparente el tratamiento T3 fue el único que cumplió lo recomendado por la NTC 5167 (< 0.6 g.cm⁻³), los demás tratamientos se encontraron por encima de lo establecido. Este parámetro hace referencia a los intersticios de aire y su granulometría, por lo que a valores bajos de densidad aparente, el producto ha sufrido alto grado de mineralización y es un material bien gradado (Epstein, 2011). También valores bajos de densidad aparente encontrados están relacionados con el contenido de carbono orgánico en los diferentes productos obtenidos.

Los productos obtenidos no cumplen completamente con los parámetros dispuestos por la norma para denominarse como un abono orgánico, enmienda orgánica húmica o no húmica (NTC 5167, 2003). Haciendo referencia a la clasificación de Soliva y Lopez, (2004), el producto que no cumple la norma, podría ser utilizado como recubrimiento de celdas en vertederos, recuperación de suelos marginales y recuperación de suelos degradados.

Se han encontrado casos exitosos de aprovechamiento agronómico de compost, sin embargo, aún es limitado el aprovechamiento del 100% de los sustratos. Al respecto Huerta *et al.* (2010), en un estudio de aprovechamiento de biorresiduos de origen municipal en una planta de compostaje de España, encontraron que del 100% del material estudiado, 27% era de calidad media, el cual podría aplicarse en agricultura extensiva, silvicultura, control de erosión, y restauración de paisaje, y cerca de un 32% era de baja calidad con limitaciones de uso y un 41% debía ser de uso controlado o incineración. Estos resultados indican que se requiere de mayores esfuerzos para llevar a cabo desarrollos tecnológicos que permitan contribuir a la gestión integral de estos materiales.

Conclusiones

La de incorporación de compost maduro no permitió mejorar las condiciones de temperatura, pH, humedad y espacio libre de aire en la mezcla de biorresiduos, lo que convierte a esta alternativa no viable para el mejoramiento del proceso de compostaje de estos materiales, lo que hace necesario formular estudios con materiales estructurantes y enmiendas que a la vez permitan adecuar la humedad inicial, la relación C/N y la porosidad en la mezcla. Esto conllevaría a que la PMRS establezca actividades de logística para adoptar materias primas adicionales en su planta y pueda establecer productos de adecuada calidad agrícola y sanitaria, que pueda recomendarse su aplicación en el suelo. Por lo que en este estudio se obtuvieron productos no aptos para su aplicación en el suelo dedicado a la agricultura de acuerdo a la normatividad colombiana.

Referencias

- Adhikari, B., Barrington, S., Martinez, J., King, S. 2008. «Characterization of food waste and bulking agents for composting ». *Waste Management* 28 (5): 795-804.
- Annan, J.S., White, R.K. 1998. Evaluation of Techniques for measuring air-filled porosity in composts of Municipal Biosolids and Wood Chips, in K.C. Das and E.F. Graves, Proc. of the Conference of Composting in the South East., Proceedings of the 1998 Conference, USA.
- Barral, MT., Domínguez, M. y Díaz, F. 2001. Usos del compost y papel de la materia orgánica del suelo. Situación Gallega. Universidad de Santiago de Compostela. España. http://ecotono.net/descargas/2005_docs/06_Documento_Usos-del-compost-y-su-papel-en-Galicia.pdf (consultado el 25 de mayo de 2009).
- Barrena, R. 2006. Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso. Memoria de Tesis. Departamento de ingeniería Química. Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona. España.
- Castrillón, O., Bedoya, O. y Montoya, D. 2006. «Efecto del pH sobre el crecimiento de microorganismos durante la etapa de maduración en pilas estáticas de compost». *Producción + Limpia* 1 (2): 87-98.
- Chang, J., Hsu, T. 2008. «Effects of compositions on food waste composting». *Bioresource Technology* 99 (17): 8068-8074.
- DNP, Departamento Nacional de Planeación. 2009. Política nacional para la racionalización del componente de costos de producción asociado a los fertilizantes en el sector agropecuario. Conpes 3577. Bogotá.
- Déportes., Benoit-Guyod. & Zmirou, Bouvier. 1998. «Microbial disinfection capacity of municipal solid waste (MSW) composting». *Journal Of Allied Microbiology* 85 (2): 238-246.
- Domingo, J.L., Nadal, M. 2009. «Domestic waste composting facilities: A review of human health risks». *Environment International* 35 (2): 382-389.
- 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). Netherlands.
- Epstein, E. 2011. Industrial composting. Environmental Engineering and Facilities Management CRC Press. Taylor and Francis Group, LLC. Printed in the United States of America.
- Flotats, X., Campos, E. 2001. «Hacia la gestión integrada y co-tratamiento de residuos orgánicos». *RETEMA Revista Técnica de Medio Ambiente* 14 (81): 41 – 53.
- Hargreaves, J.C., Adl, M.S. & Warman P.R. 2008. «A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture». *Agriculture, Ecosystems and Environment* 123 (1-3): 1-14.
- Herrera, F., Castillo, J. E., Chica, A. F. & López, B. 2008. «Use of municipal solid waste compost (MSWC) as a growing medium in the nursery

- production of tomato plants». *Bioresource Technology* 99: 287–296.
- Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers. Boca Raton, FL.
- Huerta, O., López, M., Soliva, M. y Zaloña, M. 2008. Compostaje de Residuos Municipales – Control del proceso, rendimiento y calidad del producto. Cataluña.
- Huerta, O., Martínez, X., Gallart, M., Soliva, M. y López, M. 2010. El uso de compost de residuos sólidos municipales como enmienda orgánica: aportaciones de diferentes componentes según origen. Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia (DEAB), Escola Superior. Barcelona.
- ICA-ICONTEC. 2003. Compendio sobre fertilizantes en Colombia. Norma Técnica Colombiana NTC 5167. Productos para la industria agrícola y materiales utilizados como fertilizantes y acondicionadores. Clavijo Benitez Ltda: Bogota D,C.
- InfoStat. 2012. InfoStat Group, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Iñiguez, G., Parra., J. y Velasco P. 2006. «Utilización de subproductos de la industria tequilera. parte 8. Evolución de algunos constituyentes de la mezcla de biosólidos-bagazo de agave durante el compostaje». *Rev. Int. Contam. Ambient* 22 (2): 83-93.
- Jaramillo, D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias. Medellín.
- Kuba, T., Tscho, A., Partl, C., Meyer, K. y Insam H. 2008. «Wood ash admixture to organic wastes improves compost and its performance». *Agriculture, Ecosystems and Environment* 127: 43–49.
- Kurola, J.M., Arnold, M., Kontro, M.H., Talves, M. y Romantschuk, M. «Wood ash for alication in municipal biowaste composting». *Bioresour. Technol* 102: 5214–5220.
- Marmolejo, L.F., Oviedo, E.R., Jaimes, J.C., Torres, P. (2010). «Influencia del separación en la fuente sobre el compostaje de residuos sólidos municipales». *Revista Agronómica de la Universidad Nacional Agronomía Colombiana* 28 (2): 319-328.
- Montgomery, D. (2005). Diseño y análisis de experimentos. Editorial Limusa, S.A. México.
- Oviedo, E.R. (2010). Funcionamiento de los sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos en localidades menores a 20.000 habitantes del Valle del Cauca. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle. Cali. Colombia.
- Richard, T.L., Hamelers, H.V., Veeken, A. y Silva, T. 2002. «Moisture Relationships in Composting Processes». *Compost Science* 10: 286-302.
- Sánchez, A.H. 1996. Variables de Deterioro Ambiental: Humedad Relativa y Calor. El problema de la degradación medioambiental del papel. Boletín ANABAD, XLVI. Número 2.
- Shulze, K.L. 1962. Continuous Thermophilic Composting». *Al. Microbiol*, 10: 108-122.
- Soliva, M. y López, M. 2004. Calidad del compost: Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso. España. http://mie.esab.upc.es/ms/recerca_experimentalicio/articles_ESAB/Calidad%20compost%20lodos.pdf. (Consultado el 14 de Abril 2011).
- SSPD – Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. 2008. Diagnóstico Sectorial Plantas de Aprovechamiento de Residuos Sólidos. Colombia.
- Tchobanoglus, G., Theisen, HA. y Vigil, S. 1998. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Mc Graw Hill. México.
- Tognetti, C., Mazzarino, MJ. y Laosa, F. 2007. «Improving the quality of municipal organic waste compost». *Bioresource Technology* 98 (5): 1067–1076.

Tortosa, 2011. Elaboración a escala pre-industrial de enmiendas y abonos orgánicos sólidos y líquidos mediante el co-compostaje de orujo de Oliva de dos fases o Alperujo. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. Murcia. España.

USEPA. 1993. Standards for the Use of Disposal of Sewage Sludge, Final Rules 40 CFR Part 257. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.

Versalles.gov.co. 2013. Nuestro Municipio. Alcaldía de Versalles – Valle del Cauca. Indicadores. http://versalles-valle.gov.co/indicadores_anuales.shtml?apc=bexx-1-&x=2617533#meteorologica. (Consultado el 18 Septiembre 2013).

Versalles.gov. 2012. Información del municipio. Datos del clima. <http://www.versalles-valle.gov.co/index.shtml#5>. (Consultado el 12 agosto 2012).

Victoria, F. A., Marmolejo L. F. & Torres P. 2012. «Alternativas para fortalecer la valorización de

materiales reciclables en plantas de manejo de residuos sólidos en pequeños municipios». *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* 22 (1): 59-73.

Zhang, X., Ren, J., Niu, H. y Wu, X. 2010. «Composting of Sewage Sludge Using Recycled Matured Compost as a Single Bulking Agent». *AIP Conf. Proc* 1251:177-180.

Agradecimientos

A la cooperativa de servicios públicos de Versalles por su apoyo y gestión durante la realización de este trabajo. A la Universidad del Valle por la financiación aportada con el proyecto de convocatoria interna - “Metodología para mejorar la calidad del compost obtenido con biorresiduos de origen municipal acorde con las condiciones agroambientales del contexto regional”, adelantado por los grupos de investigación IREHISA y ECCA.

Citar este artículo como:

Castro, G., Daza, M. y Marmolejo, L. 2016. “Evaluación de la adecuación de humedad en el compostaje de biorresiduos de origen municipal en la Planta de Manejo de Residuos Sólidos (PMRS) del Municipio de Versalles, Valle del Cauca.” *Gestión y Ambiente* 19(1): 179-191.