



Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Lecciones desde Colombia

Advances in Research on Biowaste Composting in Small Municipalities of Developing Countries. Lessons from Colombia

Oviedo-Ocaña Edgar Ricardo

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas
Correo: eroviedo@uis.edu.co

Marmolejo-Rebellon Luis Fernando

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Correo: luis.marmolejo@correounivalle.edu.co

Torres-Lozada Patricia

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Correo: patricia.torres@correounivalle.edu.co

Resumen

El compostaje es una de las tecnologías más empleadas para el aprovechamiento de biorresiduos, no obstante, su implementación en países en desarrollo no ha sido efectiva, debido, entre otros aspectos, a la limitada investigación para su aplicación. Este artículo presenta aportes en torno a los avances en la investigación del compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo, con base en resultados de seis años de estudios realizados por los autores. Se abordan: i) el análisis de la calidad fisicoquímica de los sustratos, ii) la evaluación de opciones para mejorar el proceso y la calidad del producto, iii) el desarrollo de herramientas para la planeación y operación de las instalaciones de compostaje. Estos avances han permitido reducir los tiempos de proceso, mejorar las condiciones para la higienización del material, cumplir con los estándares de calidad del producto, identificar pruebas para mejorar el control y monitoreo *in situ* de la estabilidad y madurez del producto y desarrollar herramientas para la selección de materiales de enmienda y de soporte. La reflexión ayuda a elucidar que la investigación, acompañada de proyectos a escala piloto, se constituye en una estrategia para posicionar el compostaje de biorresiduos como una opción adecuada de manejo de la fracción orgánica de los *residuos sólidos municipales* (RSM).

Descriptores: aprovechamiento, biorresiduos, compostaje, municipios menores, países en desarrollo.

Abstract

Composting is one of the most used technologies for biowaste recycling. However, its adoption has been ineffective in developing countries; one of the causes being the limited research for implementation in these contexts. This paper presents a contribution around progress in research on biowaste composting in small municipalities from developing countries, based on results from six years of studies conducted by the authors. Three topics are addressed: i) analysis of the physicochemical quality of substrates; ii) assessment of alternatives for improving the process and product quality; and iii) development of tools for planning and operation of composting installations. This progress has allowed reducing processing times, improve the conditions for material sanitization, fulfil the standards of product quality, identify tests for improving in situ control and monitoring of product maturity and stability, and developing tools to select bulking and amendment materials. Research together with pilot-scale projects is a significant strategy for positioning biowaste composting as an appropriate alternative for managing the organic fraction of municipal solid waste.

Keywords: resource recovery, biowaste, composting, small municipalities, developing countries.

INTRODUCCIÓN

En países en desarrollo, los biorresiduos son la mayor fracción de los *residuos sólidos municipales* (RSM) (Hoornweg y Bhada, 2012); su descomposición en rellenos sanitarios genera gases de efecto invernadero y lixivados, los cuales tienen efectos ambientales y sanitarios genera gases de efecto invernadero y lixivados, los cuales tienen efectos ambientales y sanitarios (Vergara y Tchobanoglous, 2012).

El compostaje es una de las opciones con mayor aplicación para el aprovechamiento de biorresiduos (Slater y Frederickson, 2001; Kurian, 2007); aspectos como el bajo costo y la sencillez del proceso lo han constituido como una de las tecnologías de mayor aplicación en países en desarrollo (Li *et al.*, 2013; Sundberg y Navia, 2014). Sin embargo, su aplicación en el contexto de estos países (Barreira *et al.*, 2006; Ekelund y Nyström, 2007) y en el colombiano (SSPD, 2008; Marmolejo, 2011) no ha sido efectiva.

Los municipios menores, considerados en este artículo como los de poblaciones inferiores a 15.000 habitantes (OPS *et al.*, 2010), son los que presentan las condiciones más críticas para la implementación del compostaje de biorresiduos, siendo entre las principales limitaciones, la aplicación de tecnologías no adaptadas a las condiciones locales y a las características de los residuos (Kurian, 2007), asimismo, la inadecuada atención de los requerimientos del proceso (Hoornweg *et al.*, 1999; Shekdar, 2009).

En este artículo se presentan los resultados de estudios tendientes a mejorar la operación del compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Se emplean resultados de investigaciones realizadas por los autores, algunas de las cuales son inéditas, mientras otras se han documentado en diferentes publicaciones (Marmolejo *et al.*, 2010; Oviedo *et al.*, 2013; 2014a, 2014b; 2015a; 2015b; 2015c; Soto *et al.*, 2015; Daza *et al.*, 2015) así como en dissertaciones a nivel de doctorado (Marmolejo, 2011; Oviedo, 2015) y pregrado (Rosero, 2013).

La reflexión aborda aspectos como la identificación de las características fisicoquímicas de sustratos, la evaluación de las condiciones operativas para mejorar el proceso y la calidad del producto, el desarrollo de herramientas para la selección de materiales de enmienda y de soporte y las perspectivas de la investigación para continuar fortaleciendo la implementación del compostaje en la gestión de los RSM en poblaciones menores de países en desarrollo. Aunque este trabajo utilizó poblaciones menores de países en desarrollo como caso de estudio, las reflexiones realizadas se pueden aplicar a otros tipos de poblaciones (e.g. tamaño mediano) u otros tipos de países (e.g. países desarrollados) con problemáticas en el compostaje de biorresiduos.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

El compostaje es la descomposición biológica de sustratos orgánicos, se realiza por una población microbial diversa y en condiciones predominantemente aerobias, generando un material estable, libre de patógenos, que puede aplicarse al suelo; adicionalmente se generan CO_2 , H_2O , NO_3^- y SO_4^{2-} (Haug, 1993; Stentiford y de Bertoldi, 2010).

En el proceso se distinguen dos etapas, la descomposición y la estabilización (Chiumenti *et al.*, 2005); en la primera, los microorganismos aerobios mesofílicos transforman compuestos de rápida degradación (azúcares, proteínas, almidón y aminoácidos) a especies orgánicas e inorgánicas más sencillas, determinando el consumo de O_2 , la emisión de CO_2 y la producción de energía que se libera en forma de calor (Stentiford y de Bertoldi, 2010). En esta etapa se forman fitotóxicos como NH_3 y ácidos grasos volátiles de cadena corta, los cuales se metabolizan por los microorganismos (Smårs *et al.*, 2002). El incremento en la tasa de degradación incide con el aumento de la temperatura a valores termofílicos ($> 45^\circ\text{C}$) que facilita la reducción de patógenos y la selección de microorganismos termofílicos (Insam y de Bertoldi, 2007); la actividad biológica permanece alta hasta que disminuyen los nutrientes y la materia orgánica de fácil degradación.

En la segunda etapa se descomponen moléculas más complejas, generando declinación de la temperatura y pH ligeramente alcalino hasta el final del proceso (Epstein, 2011). La población microbial termofílica disminuye y vuelven a predominar microorganismos mesofílicos y los actinomicetos degradan lentamente almidón, celulosa, hemicelulosa y ligninas, indispensables para la síntesis de sustancias húmicas (Stentiford y de Bertoldi, 2010). El producto se estabiliza biológicamente, aunque se presentan procesos biológicos de efecto moderado en el producto (Insam y de Bertoldi, 2007).

La transformación del sustrato induce alta actividad metabólica de los microorganismos, generando cambios en las condiciones del proceso y por ende, en las etapas de crecimiento exponencial, estacionarias y sucesión de grupos de organismos (Insam y de Bertoldi, 2007). En el proceso intervienen diversos grupos de microorganismos con roles definidos en la bioxidación: bacterias, hongos, actinomicetos, protozoarios y lombrices; los tres primeros degradan los residuos orgánicos (Stentiford y de Bertoldi, 2010) y los restantes ayudan a transformar estructuras orgánicas, haciéndolas disponibles a las bacterias (Chiumenti *et al.*, 2005).

Los parámetros más importantes en el proceso son: características químicas de los sustratos (carbono orgá-

nico y nutrientes), porosidad del sustrato, humedad, pH, oxígeno y temperatura del proceso, los cuales están ampliamente documentados (Haug, 1993; Insam y de Bertoldi, 2007; Krogmann *et al.*, 2010).

El producto del proceso se denomina compost y se caracteriza por tener materia orgánica estabilizada, que es compatible con el crecimiento de plantas (Stentiford y de Bertoldi, 2010) y tiene una incompleta humificación (Insam y de Bertoldi, 2007). Presenta propiedades fisicoquímicas que determinan sus características y usos, entre las que se encuentran el *carbono orgánico total* (COT), capacidad de intercambio catiónico (CIC), N_{Total} y N_{inorgánico}, pH, *conductividad eléctrica* (CE), macro y micronutrientes, densidad aparente, humedad, *capacidad de retención de agua* (CRA) y tamaño de partícula. Una descripción de estos parámetros se encuentra en Sullivan y Miller (2001) y Hargreaves *et al.* (2008).

COMPOSTAJE DE BIORRESIDUOS EN MUNICIPIOS MENORES DE PAÍSES EN DESARROLLO

IDENTIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS BIORRESIDUOS

Los biorresiduos son la fracción orgánica biodegradable de los RSM y denotan los materiales separados en la fuente y recolectados selectivamente antes de introducirlos a la cadena de manejo de RSM. Provienen de residuos de jardín y de alimentos de las viviendas y de establecimientos comerciales. Se excluyen residuos agrícolas y forestales, estiércoles animales, biosólidos u otros biodegradables (textiles, papel y madera) (EC, 2008). Mientras que en países desarrollados la proporción de biorresiduos en los RSM es del orden de 30 a 40%, en países en desarrollo oscila entre 50 y 70% (Troschinetz y Mihelcic, 2009). Estudios realizados en seis municipios menores que Colombia, muestran que la proporción varía entre 62 y 65% (Marmolejo, 2011).

La localización, estilos de vida, hábitos de preparación de alimentos y condiciones socio-económicas, son factores que afectan la cantidad y la composición de los biorresiduos. Estos sustratos se caracterizan por una alta proporción de residuos de alimentos, tal como lo reportan Oviedo *et al.* (2015a) quienes encontraron en una instalación de compostaje en un municipio menor a Colombia, que 92.9% ($\pm 4.3\%$) corresponde a alimentos sin procesar, entre los que se encontraban en mayor proporción plátanos y tubérculos (32.6%) y frutas cítricas (15.5%). Estos residuos son altamente variables por su composición de materia orgánica rápidamente degradable que lo hacen complejo de manejar (Iacovidou *et al.*, 2012).

La evaluación fisicoquímica de los biorresiduos en esta población muestra que presentan condiciones críticas para el compostaje (tabla 1), tales como pH ácido, exceso de humedad, deficiencias en COT y P_{Total} y una relación C/N inferior a la recomendada para el inicio del compostaje. Estas características son similares a las encontradas en otras poblaciones de Colombia (Marmolejo, 2011) y son relativamente distintas a las reportadas para biorresiduos en países desarrollados como España y Francia, tal como lo muestran López *et al.* (2010), Huerta *et al.*, (2011) y Francou *et al.* (2006) (e.g. contenido COT, N_{Total}, P_{Total}) (tabla 1).

EVALUACIÓN DE OPCIONES PARA MEJORAR LA CALIDAD DE LOS SUSTRADOS Y SU EFECTO EN EL PROCESO Y EN LA CALIDAD DEL PRODUCTO

Debido a las limitaciones que presentan los biorresiduos para un compostaje efectivo, es necesario evaluar opciones de acondicionamiento del sustrato.

Con el propósito de analizar la transformación de la materia orgánica de este tipo de sustratos, los autores desarrollaron un experimento en el que evaluaron la influencia del pH y los nutrientes sobre la biodegrada-

Tabla 1. Características fisicoquímicas de los sustratos del compostaje de biorresiduos

Parámetros	Units	Alcalá ¹	Bolívar ¹	El Dovio ¹	La Victoria ¹	Localidad objeto de estudio ^{2*}	España ³	Francia ⁴	Sur Corea ⁵
pH		6.50	5.48	7.90	5.81	5.5±0.5	5.26	5.4	4.4
Humedad	% bh	82.54	69.0	76.29	66.6	76.7±3.2	70.84	90	80
Cenizas	% bs	21.05	36.8	24.67	52.4	25.1±5.6	--	--	--
COT	% bs	31.79	22.19	32.48	24.82	33.0±4.8	42.6	41.6	53.0
N _{Total}	N (% bs)	1.70	1.89	1.24	1.41	1.6±0.5	2.5	2.1	2.2
C/N	-	18.7	11.7	26.2	17.6	21.7±5.3	17.0	20.1	24.1
P _{Total}	P (% bs)	0.36	0.59	0.43	0.18	0.3±0.1	0.58**	--	--
K _{Total}	K (% bs)	3.18	1.85	1.78	2.05	1.6±0.5	1.14**	--	--

Note: ¹Marmolejo (2011); ²Oviedo (2015); * obtenida de 39 sesiones de monitoreo en la localidad objeto de estudio; ³López *et al.* (2010); **Huerta *et al.* (2011); ⁴Francou *et al.* (2006); ⁵Kim *et al.* (2008)

bilidad aerobia de los biorresiduos (Soto *et al.*, 2015). El experimento se realizó a escala de laboratorio, empleando técnicas respirométricas. Las condiciones más favorables para la cinética de transformación se presentaron cuando el sustrato se ajustó a pH entre 7 a 8 (i.e. se añadió NaOH a 50% de pureza) y conjuntamente se adicionaron nutrientes (i.e. se añadió 1 mL por cada 1 L del reactor en forma de una solución de KH_2PO_4 – 8.5g, K_2HPO_4 – 21.7g, $\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{H}_2\text{O}$ – 33.4g, NH_4Cl – 2.0 g), evidenciándose mayores tasas de biodegradación y de crecimiento de biomasa. Esto reitera la necesidad de acondicionar los sustratos para mejorar el desempeño del proceso en las instalaciones de compostaje.

El mejoramiento de la calidad de los sustratos en las instalaciones de compostaje, requiere propuestas de operación, como la incorporación de **materiales de soporte** (controlan la humedad, suministran porosidad y mejoran la aireación) o **de enmienda** (mejoran las características químicas de sustratos) (Epstein, 2011). El **co-compostaje** es otra medida que involucra dos sustratos con el propósito de mejorar la eficiencia del proceso y la calidad del producto, y el **aditivo** es una mezcla de microorganismos, nutrientes minerales, formas de C fácilmente disponibles, enzimas y compuestos para balancear el pH, que se utilizan para mejorar la actividad microbiana en los sustratos (Gabhane *et al.*, 2012).

En general, distintos materiales se han empleado para optimizar el compostaje de biorresiduos: Adhikari *et al.* (2008) con paja de trigo y pasto picado, Francou *et al.* (2008) con residuos verdes y papel y cartón, Chang y Chen (2010) con cáscara de arroz y aserrín, y Kumar *et al.* (2010) con residuos de poda de jardín y hojas. Los materiales vegetales como la poda son fuente de N, ayudan a regular la humedad y mejoran la estructura y aireación (López *et al.*, 2010). El bagazo de caña de azúcar es un material lignocelulósico utilizado para mejorar el COT en los sustratos (Iqbal *et al.*, 2010).

En condiciones de acceso limitado a materiales de soporte o enmienda, el compost o el material en proceso (precompost) se emplean para la neutralización de ácidos y el suministro de especies microbiales que aceleran el proceso (Kato y Miura, 2008; Li *et al.*, 2013). Experiencias en el compostaje de estiércol bovino (Kato y Miura, 2008) o de biorresiduos (Lu y Guo, 2009) han encontrado reducción en los tiempos de proceso. Aunque la aplicación de precompost o compost en las instalaciones de compostaje puede restringirse debido a la necesidad de almacenar producto, se podría recircular material que se encuentra en proceso (precompost) para mejorar el inicio del proceso de compostaje de biorresiduos, tal como se ha implementado en algunas instalaciones de compostaje en el Valle del Cauca.

Por otro lado, el pH ácido de los sustratos requiere controles operacionales como el incremento en la aireación y la adición de material alcalino (Wong *et al.*, 2009) para minimizar el efecto de la acidez en el proceso; estas opciones son efectivas en diversos estudios (Kuba *et al.*, 2008; Wong *et al.*, 2009; Kurola *et al.*, 2011).

La selección de materiales en instalaciones de compostaje requiere el desarrollo de criterios que consideren las características de los sustratos y condiciones socioeconómicas y técnicas, tal como propuso Oviedo (2015), quien consideró los siguientes criterios:

- i) Calidad del material: debe contribuir a mejorar las condiciones de C/N, humedad, pH, otros nutrientes y porosidad de los biorresiduos
- ii) Cantidad del material: debe estar disponible en las cantidades requeridas para emplearse en la instalación de compostaje
- iii) Costo de adquisición del material: debe tener un costo mínimo, de manera que no genere mayores costos operativos en la instalación de compostaje
- iv) Acceso para consecución del material: debe tenerse en cuenta el tipo de vía de acceso para recolectarlo
- v) Distancia para recolección del material: debe considerarse la distancia desde la instalación de compostaje hasta el centro de generación
- vi) Disposición para entrega de material: debe estar disponible la mayor cantidad de tiempo posible, para incorporarse en el procesamiento de los biorresiduos
- vii) Facilidades de manejo del material: no deben generar mayores cambios operativos en la instalación de compostaje (i.e. acondicionamiento del material en actividades de selección y clasificación, secado y triturado). La tabla 2 presenta los criterios propuestos para la selección de los materiales de enmienda y soporte.

En el estudio de Oviedo (2015) se realizó un inventario de materiales de enmienda y soporte en un municipio menor que Colombia, identificando los materiales: residuos de cosecha de frutas, bagazo de caña (BC), pasto estrella (PE), material en proceso (MP) (precompost), cenizas de madera (CM), estiércol bovino, estiércol porcino y pollinaza. La aplicación de la herramienta de selección permitió escoger de entre los ocho materiales, los cuatro siguientes: CM, MP, BC y PE, los cuales se evaluaron en experimentos a escala piloto de compostaje de biorresiduos, como se indica a continuación:

- Oviedo *et al.* (2014a) evaluaron la adición de CM (proporción de 2, 4 y 8% en base húmeda definidas con base en Kuba *et al.* (2008); Wong *et al.* (2009) y

Tabla 2. Criterios de selección de materiales para mejorar la calidad de los sustratos

% ¹	Indicadores	%	Medición ²	Valores posibles	Valor deseado	Calificación (puntos)
% Calidad requerida del material (CARM) ²	28	Cumple criterio de C/N	Si/No			Si→5
	24	Cumple criterio de humedad	Si/No			
	24	Cumple criterio de pH	Si/No	Si		
	12	Cumple criterio de nutrientes	Si/No			No→1
	12	Suministra porosidad	Si/No			
% Cantidad requerida de material (CRM)	100	CRM para complementar sustrato en términos de masa – elaborado con balance de masa alrededor de C y N.	CRM<99	Cantidad entre 0 y 15%	Ind _{costo} ≥0	menor de 0%→0
						Mayor de 30%→1
% Menor costo de adquisición (Ind _{costo})	100	Costo material / mayor costo de todos los materiales	Ind _{costo} ≥0	Ind _{costo} ≤0,5	Ind _{costo} ≥0,5→1	Entre 15 y 30%→3
						Menor de 15%→5
% Acceso para consecución del material	100	Tipo de vía acceso		Pavimentada		Pavimentada→5
				Afirmado		Afirmado→4
				Carreteable	Pavimentada	Carreteable→3
				Trocha		Trocha→2
				No existe		No existe→0
% Distancia al Sistema A	100	Distancia al SA (D)	D≥0	D=0	D=0	D = 0 km→5
						1 < D < 3 km→4
						3 ≤ D < 5→3
% Disposición para entrega de material	100	Presenta restricciones para suministro continuo	Si No	No	Si→1 No→5	D≥5→1
% Facilidades de manejo del material	100	Requerimientos operativos	Clasificación y trituración Trituración No requiere	No requiere	Clasificación y trituración→1 Trituración→3 No requiere→5	Clasificación y trituración→1
						Trituración→3
						No requiere→5

Nota: ¹Valores de ponderación que se pueden proponer acorde con las condiciones de contexto; ²la descripción de cada una de las formas de medición de los criterios se presenta a detalle en Oviedo (2015)

Kurola *et al.* (2011), la cual resultó favorable para incrementar el pH inicial, mejorar el contenido nutricional de los sustratos (i.e. se incrementó contenido de K_{Total} y P_{Total} con 4% y 8%) y amortiguar los ácidos generados en la primera fase del proceso (i.e. tuvo valores al inicio de pH al inicio del proceso entre 7.2 y 9.0, mientras que sin adición de cenizas se presentaron 5.0 y 5.9); sin embargo, no tuvo efecto en acelerar el arranque del proceso y se observó un excesivo incremento del pH con la adición de 4 y 8% de CM, que asociado con temperaturas termofílicas pudieron propiciar mayores pérdidas de N_{Total}. Las pruebas de germinación en los productos con CM mostraron presencia de fitotóxicos que pueden comprometer el uso del producto.

- Oviedo (2015) evaluó la incorporación de MP (proporción de 25% estimada con base en balances de

masa alrededor de la humedad), identificando que este contribuyó a mejorar la humedad inicial (i.e. 72% en biorresiduos y 63.7% en la mezcla de biorresiduos con MP) y el COT de los sustratos (i.e. 31.2% en biorresiduos y 36.9% en la mezcla de biorresiduos con MP), facilitando la obtención de mayores temperaturas en el rango termofílico respecto al compostaje de biorresiduos; no obstante, se presentaron similares tiempos de duración de las etapas termofílica y de enfriamiento y la obtención de un producto con características fisicoquímicas similares, reportándose únicamente diferencias significativas en la C/N y las cenizas ($p<0.05$).

- Oviedo *et al.* (2015b) evaluaron en dos experimentos la incorporación del PE, en el primero (proporción de 34% base húmeda definida teniendo en cuenta experiencias previas (Oviedo *et al.*, 2013)) y del BC en el segundo (proporción de 22% base húmeda de-

finida a través de un balance de masa alrededor de la relación C/N), encontrando que en comparación con las pilas con 100% de biorresiduos (control), se aceleró el arranque del proceso, redujo la duración de la etapa termofílica y propiciaron condiciones adecuadas para la higienización del material (i.e. se presentaron temperaturas en el rango termofílico por más de dos semanas, tal como lo recomienda Böhm (2007) donde se reflejó en valores de coliformes fecales de 0 NMP/g y 23 NMP/g en el primero y segundo experimento, respectivamente); no obstante, compuestos de difícil degradación en estos materiales, pueden ser la causa de una mayor duración en las fases de enfriamiento y maduración. La incorporación del PE y el BC contribuyó a mejorar la calidad de los productos en relación con el control (tabla 3), obteniéndose niveles de COT, CIC, densidad y CRA que en su uso, pueden mejorar las propiedades del suelo, tales como la retención de nutrientes y agua e incremento en la actividad microbiana. Se observa además, un mayor cumplimiento de la norma técnica colombiana.

Los resultados en la calidad del producto guardan relación con lo reportado en estudios de países en desarrollo (Barreira *et al.*, 2006 en São Paulo-Brasil; Adekunle *et al.*, 2010 en Abeokuta-Nigeria; Saha *et al.*, 2010 en ciudades de India), en los que el compostaje de biorresiduos sin la incorporación de materiales (enmienda o soporte), se caracterizan por presentar altos valores de pH y CE, limitado contenido de COT o alto material inerte, restringiendo la comercialización del producto. Las estrategias de control presentadas en este estudio, contri-

buyen con el cumplimiento de estándares de calidad del producto e incrementan la competitividad del compost de biorresiduos frente a otros productos de fertilización.

Teniendo en cuenta que además de los biorresiduos, las instalaciones de compostaje reciben material proveniente del corte de césped y poda de árboles, se propusieron otros experimentos que evaluaron a escala piloto el compostaje de residuos de alimentos no procesados (RANP) y de poda de árboles y corte (RPAC) de césped. Para tal efecto, se analizaron dos tratamientos con su réplica: tratamiento A (100% peso húmedo de RPAC) y tratamiento B (40% peso húmedo de RANP y 60% de RPAC). El sustrato del tratamiento B presentó mejores condiciones para el inicio del proceso (i.e. C/N: 20.1, humedad: 74% y P_{Total}: 0.39%) respecto del tratamiento A (C/N: 14.8, humedad: 25.4% y P_{Total}: 0.28%). Esto se reflejó en mejores condiciones de proceso, tales como menor tiempo para alcanzar las temperaturas termofílicas, temperaturas más altas y de mayor duración para la higienización del producto y menor duración de la fase de enfriamiento (7 días) respecto del tratamiento A. Asimismo, la calidad del producto se favoreció con contenidos superiores de nutrientes (Tratamiento B: N_{Total}: 2.1%, P_{Total}: 0.54% y K_{Total}: 3.1%; Tratamiento A: N_{Total}: 1.6%, P_{Total}: 0.45% y K_{Total}: 2.7%), que coinciden con las mejoras en la calidad del producto reportadas en los estudios previos.

Por otro lado, debido al alto contenido de humedad identificado en los biorresiduos, Oviedo *et al.* (2014b) evaluaron el efecto del incremento en la frecuencia de volteo en el proceso de compostaje. En este estudio, reportaron la disminución en el tiempo del proceso con

Tabla 3. Calidad de los productos en experimentos evaluando la incorporación de PE y BC

Parámetro	Unidad	Experimento 1		Experimento 2		NTC 5167 ⁴
		Control ¹	A ²	Control ¹	B ³	
pH	Unidad	10.10±0.28	9.90 ± 0.17	8.01±0.13*	7.38 ± 0.07*	>4 y <9
Humedad	% (m/m)	32.77±5.6	34.50±3.3	39.00±0.9*	49.47±11.1*	<35
COT	% (m/m)	13.73±0.4*	18.87±2.7*	12.77±1.97*	17.77±1.46*	>15
N _{Total}	% (m/m)	0.90±0.12*	2.02±0.50*	1.54±0.51	0.90±0.69	>1
C/N	--	14.77±1.9	9.67±3.1	9.43±5.4	28.23±18.7	-
Cenizas	% (m/m)	65.67±2.3*	61.03±1.3*	62.63±1.9*	57.23±1.0*	<60
K _{Total}	% (m/m)	3.23 ± 0.38	3.92 ± 0.13	3.78±0.37*	3.11±0.40*	>1
P _{Total}	% (m/m)	1.32 ± 0.06*	1.26 ± 0.10*	1.45±0.17*	1.04±0.08*	>1
Densidad	g/cm ³	0.55 ± 0.1*	0.34 ± 0.0*	0.61±0.03*	0.44±0.07*	<0.6
CRA	%	120.4± 6.9*	165.6±18.6*	124.4±7.1*	168.83±9.9*	>100
CIC	meq/100g	49.7 ± 1.6	50.0 ± 2.7	52.3 ± 0.9*	56.2±1.9*	>30
Coliformes Fecales	NMP/g	0,0	0,0	17,0*	23,0*	--

Nota: ¹Control: 100% biorresiduos; ²A: 34% PE + 66% biorresiduos; ³B: 22% BC + 78% biorresiduos; ⁴Norma Técnica Colombiana referente a productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. * Parámetros con diferencias estadísticas significativas (P<0.05). Valores promedio de tres réplicas

20% en las fases mesofílica, termofílica y de enfriamiento, no obstante, se observó una disminución en el contenido nutricional en el producto. Los resultados de este estudio evidencian que los esquemas de control y monitoreo acordes con las condiciones locales, pueden ser efectivos para mejorar el desempeño del proceso y plantea nuevos retos en la investigación, tales como la evaluación conjunta del efecto del incremento de la frecuencia del volteo y de la adición de materiales de soporte (o enmienda) sobre el proceso y la calidad del compostaje.

CONSIDERACIONES SOBRE LA CALIDAD DEL PRODUCTO Y POTENCIALES USOS

Una de las condiciones críticas para determinar la calidad de los productos y potenciar su uso y comercialización, está relacionada con la presencia de contaminantes; un compost de calidad no se logra si los sustratos contienen impurezas o componentes indeseables, como metales pesados o compuestos orgánicos persistentes (Hargreaves *et al.*, 2008; López *et al.*, 2010). El producto generado a partir de residuos mezclados, puede ser de baja calidad y afectar la aceptación por los agricultores, restringiendo su comercialización (Zurbrügg *et al.*, 2004).

Esto se corroboró por los autores en el contexto de un municipio menor de países en desarrollo, en el que se evaluó la influencia de la separación en la fuente sobre el proceso y la calidad del producto del compostaje de biorresiduos (Marmolejo *et al.*, 2010; Marmolejo, 2011). Este estudio mostró que a pesar de ser factible el proceso de compostaje de sustratos separados en la fuente (SSF) y separados en planta (SSP), sin inhibición del proceso, el compostaje con los sustratos separados en la fuente presentó menor tiempo para la transformación de la materia orgánica (entre 10 y 19 días) y facilitó la obtención de un producto con mayores contenidos de COT (9.7% respecto a 5.6% de SSP) y P_{total} (0.65% respecto a 0.36% de SSP), mejores condiciones en cuanto a CRA (173.1% respecto a 107.9% de SSP) y densidad aparente (0.44 g/cm³ respecto a 0.65 g/cm³ de SSP), menor proporción de impurezas (3.47% respecto de 7.4% de SSP) y mejor calidad microbiológica (menor en dos órdenes de magnitud (1x10²) respecto de SSP), factores clave de la calidad del producto final.

Entre los contaminantes más comunes están los metales pesados; su presencia en el producto depende de su concentración en los biorresiduos (i.e. asociado a deficiente separación en la fuente y recolección selectiva de los residuos sólidos) y de la posible contaminación en el proceso; los metales pesados presentes con mayor

frecuencia en compost de biorresiduos son el Cd, Cr, Ni, Pb y Zn (Farrell y Jones, 2009). En cuatro experimentos de compostaje de biorresiduos (Marmolejo, 2011; Oviedo *et al.*, 2013; Oviedo *et al.*, 2015b) se observó que los productos cumplieron los límites de metales pesados de normas de Colombia, India, Reino Unido e Italia, lo cual se asocia al efecto de prácticas como la separación en la fuente.

La madurez y la estabilidad son otros de los criterios para evaluar la calidad del producto en el uso de actividades agrícolas o mejorador de suelo; aunque existen diferentes pruebas para evaluarlas, la aplicación de pruebas de laboratorio en instalaciones de compostaje de municipios menores de países en desarrollo puede ser limitada debido a costos y a la complejidad de su aplicación. En estas instalaciones se aplican pruebas de monitoreo *in situ*, con las que se toman decisiones operativas y de finalización del proceso. Oviedo *et al.* (2015c) evaluaron pruebas empleadas para determinar la estabilidad y madurez *in situ* (temperatura, pH, humedad, CE, olor y color) con pruebas de mayores requerimientos de laboratorio (sólidos volátiles-SV, relación C/N, autocalentamiento, índice respirométrico-IR e índice de germinación-IG). Los resultados mostraron que las pruebas de monitoreo empleadas tradicionalmente *in situ* para evaluar la estabilidad (temperatura, color y humedad) no fueron consistentes con pruebas más complejas de laboratorio (IR, autocalentamiento y SV). En relación con la madurez, se encontraron resultados consistentes entre la prueba de laboratorio (IG) con las pruebas *in situ* (pH y CE). Esto muestra que en las instalaciones de compostaje se requiere el uso simultáneo de pruebas *in situ* con las de laboratorio. Estrategias de regionalización de laboratorios pueden ser efectivas para que varias instalaciones de compostaje compartan infraestructura y equipos que les permitan el desarrollo de pruebas con cierta complejidad.

De acuerdo con el uso del compost de biorresiduos, se ha identificado que mejora la fertilidad del suelo, es fuente de nutrientes y materia orgánica, contribuye con la estructura y el mantenimiento de las propiedades del suelo (Odlare *et al.*, 2011) y con la actividad biológica (Farrell y Jones, 2009). No obstante, los efectos dependen de las características del suelo, donde es necesario considerar sus requerimientos para la aplicación del producto.

En el experimento de Rosero (2013) (desarrollado en el marco de las investigaciones de los autores) se evaluó el crecimiento de maíz en un suelo andisol, con la aplicación del producto mejorado provenientes del experimento con la adición de PE (tabla 3), con y sin

fertilizante (Fertilizante 10-30-10), comparándolos además con un testigo (sin producto) y con la aplicación únicamente del Fertilizante 10-30-10. Se encontró un efecto positivo con la adición del producto mejorado en propiedades del suelo, como el pH, CE, C_{orgánico}, actividad microbiana y N_{Total}. Por otro lado, el producto mejorado en combinación con Fertilizante 10-30-10 generó las mayores alturas de crecimiento del maíz (50 días de la evaluación), lo cual se atribuye al aporte de C_{orgánico} del suelo, a la vez que permitió que el N estuviese disponible para la planta hasta alcanzar su madurez fisiológica. Este mismo producto permitió obtener al final del experimento, el tallo con mayor diámetro, situación que puede estar asociada con el contenido de K y P en el material evaluado. Estos dos experimentos evidencian, por un lado, las limitaciones del compost proveniente únicamente de biorresiduos, pero muestran que las investigaciones tendientes a mejorarlo, se han hecho efectivas en la consecución de este propósito.

Finalmente, el uso agronómico representa un mercado potencial para el compost de biorresiduos por su valor nutritivo y potencial para mejorar la calidad del suelo (Farrell y Jones, 2009). Otros usos son los cultivos no alimentarios, jardinería y recuperación de suelos erosionados y contaminados (Saha *et al.*, 2010). Una de las estrategias para mejorar la comercialización del producto, es la selección de los sistemas agroambientales potenciales receptores del compost de biorresiduos.

Daza *et al.* (2015) propusieron una metodología para la selección de estos sistemas agroambientales (tabla 4); su evaluación en un caso de estudio les permitió seleccionar entre cuatro potenciales sistemas (cultivos de mora, cultivo de café, ganadería y áreas degradadas), el más adecuado para el uso del producto generado en la instalación de compostaje (café). Este tipo de herramientas, podría ayudar a orientar el funcionamiento del proceso de compostaje en las instalaciones, permitiendo desarrollar un producto que satisfaga los requerimientos de los potenciales sistemas agroambientales receptores.

PERSPECTIVAS PARA FORTALECER EL COMPOSTAJE DE BIORRESIDUOS EN PAÍSES EN DESARROLLO

En este artículo se ha enfatizado en estudios conducentes a identificar las características de los biorresiduos y a proponer mejoras en el proceso y en la calidad del producto, tal como se muestra en la figura 1. No obstante, la operación de sistemas de compostaje de biorresiduos no solo depende de aspectos tecnológicos sino de otros aspectos relacionados con la gestión de residuos sólidos municipales, tales como sociales, institucionales, políticos, regulatorios, económicos y financieros (Zurbrügg *et al.*, 2012).

Esta situación plantea retos de investigación en otras dimensiones, en aspectos tales como:

- i) El análisis de formas organizativas para incorporar principios de gestión empresarial en la administración de los sistemas de compostaje
- ii) El desarrollo de estudio que permitan el establecimiento de estándares de calidad del producto acorde con los distintos usos
- iii) El desarrollo de proyectos demostrativos, involucrando sector productivo agropecuario, de manera que se facilite la promoción y uso del compost
- iv) La adaptación de estudios que permitan evaluar los impactos ambientales asociados al compostaje de biorresiduos y su comparación con otras opciones, de manera que suministren información para la formulación de política pública de aprovechamiento de biorresiduos y se tengan insumos para plantear políticas de incentivos por los costos ambientales evitados al implementar el compostaje de biorresiduos
- vi) El desarrollo de proyectos pilotos y estrategias sociales para la puesta en marcha de la separación en la fuente y la recolección selectiva, así como para la identificación de estrategias que permitan fortalecer la participación comunitaria en el ciclo de proyectos de compostaje de biorresiduos.

Tabla 4. Indicadores de la metodológica para la selección de los sistemas agroambientales (SA)

Variable	Indicadores	Medición	Valores posibles	Valores deseables
Ambientales	SA ¹ susceptibles de erosión	Nivel de MOS ²	0<MOS<4	MOS<4
			Ninguna	
	SA que inducen degradación biológica	Actividad Microbiana	Muy baja	
			Baja	Ninguna
			Moderada	
			Ideal	
Técnicas	SA en conflicto de uso de tierra	Conflicto de uso del suelo (CU).	sin CU Sobreutilización Subutilización	Sobreutilización
	Cantidad requerida por el SA	Veces de cantidad requerida.	CR > 0 CR > 2	CR > 0 CR > 2
	Capacidad del SA de generar potenciales enmiendas	Cumplimiento generación enmiendas	Cumple, No Cumple	Cumple
			Pavimentada Afirmado	
Socio-económicas	Acceso al SA	Tipo de vía de acceso	Carreteable Trocha No existe	Pavimentada
	Distancia al SA	Distancia al SA	D > 0 D < 5 km	D > 0 D < 5 km
	Tenencia de la tierra en SA	TT= (# de propietarios sistema) / (# de predios en el SA)	TT>0	TT=100%
	Extensión del SA	ESA= Área SA/ Área localidad	ESA >0	ESA > 50%
Institucionales	Presencia de organizaciones en los SA	% organizaciones activas (OA) en SA	0<OA<100%	OA > 80%
	Aceptación uso del compost	% organizaciones que aceptan producto (A)	A >=0	A >= 80%
	Interés institucional (II) en uso y conservación del SA	II= presupuesto SA / mayor presupuesto de los SA	II>0	II = 1.0

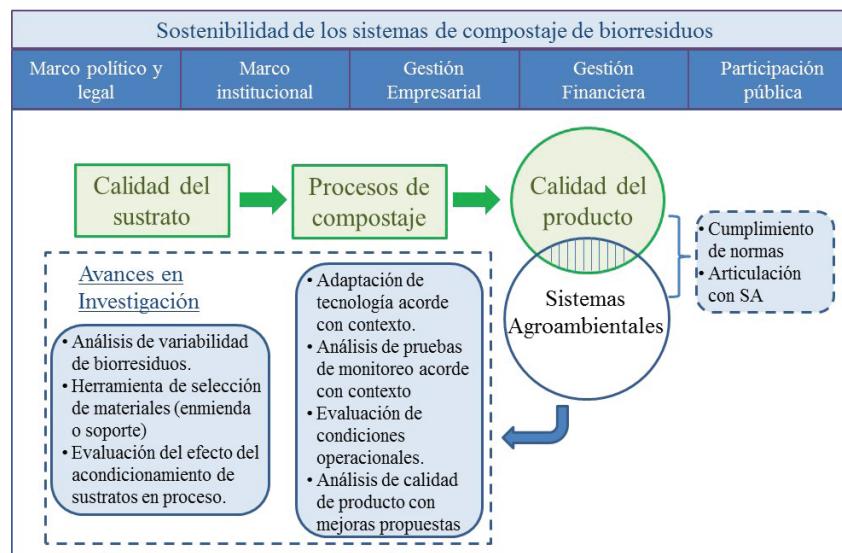
Fuente: Daza et al. (2015); ¹SA: Sistema Agroambiental; ²MOS: materia orgánica del suelo

Figura 1. Síntesis de avances de la investigación en sistemas de compostaje de biorresiduos en municipios menores

CONCLUSIONES

- La calidad de los sustratos de los municipios menores de países en desarrollo presentan deficiencias para el proceso del compostaje, generando productos que no cumplen con estándares de calidad, limitando su uso y comercialización.
- Los avances en la evaluación de opciones para mejorar el proceso y la calidad del producto se han hecho efectivos para disminuir los tiempos de proceso, mejorar las condiciones de higienización del material y el mayor cumplimiento de estándares de calidad del producto.
- El desarrollo de metodologías para la selección de materiales de enmienda o de soporte, así como de los sistemas agroambientales, se constituyen en herramientas de planeación que orientan el funcionamiento de las instalaciones de compostaje.
- Se debe continuar el desarrollo de investigación, concretamente en aspectos como: evaluación conjunta de opciones operativas como el incremento en la frecuencia de volteo y la adición de materiales, la adaptación de pruebas de laboratorio para evaluar *in situ* la estabilidad del material, la evaluación de productos mejorados en los sistemas agroambientales predominantes en una población, y la validación de las herramientas propuestas en otros contextos.
- La investigación y el desarrollo de proyectos a escala piloto en el contexto de poblaciones menores, pueden contribuir a mejorar el funcionamiento de las instalaciones de compostaje de biorresiduos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Valle y a la Universidad Industrial de Santander por el financiamiento de los proyectos de investigación en el marco de los cuales se desarrolló este artículo de reflexión. Los proyectos son: i) Metodología para mejorar la calidad del compost obtenido con biorresiduos de origen municipal acorde con las condiciones agroambientales del contexto regional, ii) Efecto de la variabilidad de la calidad de los sustratos en el compostaje de biorresiduos de origen municipal y iii) Evaluación de opciones para la implementación del compostaje de residuos sólidos orgánicos de rápida degradación en el campus de la Universidad Industrial de Santander, sede principal.

REFERENCIAS

Adekunle I.M., Adekunle A.A., Akintokun A.K., Akintokun P.O., Arowolo T.A. Recycling of organic wastes through compos-

- ting for land applications: a Nigerian experience. *Waste Management & Research*, volumen 29 (número 6), 2010: 582-593.
- Adhikari B., Barrington S., Martinez J., King S. Characterization of food waste and bulking agents for composting. *Waste Management*, volumen 28 (número 5), 2008: 795-804.
- Barreira L., Philippi A., Rodrigues M. Usinas de compostagem do estado de São Paulo qualidade dos compostos e processos de produçao. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, volumen 11 (número 4), 2006: 385-393.
- Böhm R. Pathogenic Agents, en: *Compost Science and Technology*, Diaz L.F. et al., Eds. Waste Management Series 8, 2007.
- EC – European Commission. Green Paper on the management of biowaste in the European Union. Communication of the Commission, European Commission, 2008 [en línea] [Fecha de consulta: mayo 25, 2015]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/waste/compost/developments.htm>.
- Chang J. y Chen Y.J. Effects of bulking agents on food waste composting. *Bioresource Technology*, volumen 101 (número 15), 2010: 5917-5924.
- Chiumenti A., Chiumenti R., Diaz L., Savage G., Eggerth L., Goldstein N. Modern composting technologies, Singapore. *BioCycle Journal of Composting y Organics Recycling*, 2005: 12-18.
- Daza-Torres M., Oviedo-Ocaña E.R., Marmolejo L.F., Torres P. Selección de sistemas agroambientales con potencial uso de compost de biorresiduos municipales. *Acta Agronómica*, volumen 64 (número 2), 2015: 135-145.
- Ekelund L., Nyström K. *Composting of municipal waste in South Africa*, (tesis maestría), Suecia, Upsala Universitet, junio, 2007, 71 p.
- Epstein E. *Industrial composting: environmental engineering and facilities management*, 2a ed., EU, CRC, Tailor & Francis Group, Press. Boca Raton, 2011, pp. 15-24.
- Farrell M., Jones D.L. Critical evaluation of municipal solid waste composting and potential compost markets. *Bioresource Technology*, volumen 100 (número 19), 2009: 4301-4310.
- Francou C., Linéres M., Derenne S., Villio-Poitrenaud M., Houot, S. Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting. *Bioresource Technology*, volumen 99 (número 18), 2008: 8926-8934.
- Gabhane J., William S.P., Bidyadhar R., Bhilawé P., Anand D., Vaidya A.N., Wate S.R. Additives aided composting of green waste: Effects on organic matter degradation, compost maturity, and quality of the finished compost. *Bioresource Technology*, volumen 114, 2012:382-388.
- Hargreaves J., Adl M., Warman P. A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, volumen 123 (número 1), 2008:1-14.
- Haug R.T. *The Practical Handbook of Compost Engineering*, Boca Raton, Lewis Publishers, 1993, pp. 205-258.
- Hoornweg D., Thomas L., Otten L. Composting and Its Application in Developing Countries. Published for Urban Development Division. The World Bank, 1999 [en línea] [Fecha de

- consulta: mayo 25, 2015]. Disponible en: http://www.worldbank.org/urban/solid_wm/erm/CWG%20folder/uwp8.pdf
- Hoornweg D., Bhada-Tata P. What a waste: A global review of solid waste management. Washington DC, Estados Unidos, Urban Development Series Knowledge Papers No. 15. The World Bank, 2012, 98 p.
- Huerta-Pujol O., Gallart M., Soliva M., Martínez-Farré F.X., López M. Effect of collection system on mineral content of biowaste. *Resource Conservation and Recycling*, volumen 55 (número 11), 2011:1095-1099.
- Iacovidou E., Ohandja D., Gronow J., Voulvoulis N. The Household use of food waste disposal units as a waste management option: A review. *Critical reviews in environmental science and technology*, volumen 42 (número 14), 2012:1485-1508.
- Insam H., de Bertoldi M. Microbiology of Composting Process, en: Diaz L.F., de Bertoldi M., Bidlingmaier W., Stentiford E., Waste Management Series 8, Compost Science and Technology, United Kingdom, Elsevier Ltd., 2007, pp. 25-48.
- Iqbal M.K., y Shafiq T., Ahmed K. Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost. *Bioresource Technology*, volumen 101 (número 15), 2010:1913-1919.
- Kato K. y Miura N. Effect of matured compost as a bulking and inoculating agent on the microbial community and maturity of cattle manure compost. *Bioresource Technology*, volumen 99 (número 9), 2008:3372-3380.
- Kim J., Park J., In B., Kim D., Namkoong W. Evaluation of pilot-scale in-vessel composting for food waste treatment. *Journal of hazardous materials*, volumen 154 (números 1-3), 2008: 272-277.
- Krogmann U., Körner I., Diaz L.F. Composting: Technology, en: Christensen T., *Solid Waste Technology & Management*, United Kingdom, Blackwell Publishing Ltd., 2010, pp. 533-568.
- Kuba T., Tschöll A., Partl C., Meyer K., Insam H. Wood Ash Admixture to Organic Wastes Improves Compost and its Performance. *Agriculture Ecosystems and Environment*, volumen 127 (números 1-2), 2008: 43-49.
- Kumar M., Ou Y., Lin J. Co-composting of green and food waste at low C/N ratio. *Waste Management*, volumen 30 (número 4), 2010: 602-609.
- Kurian J. Experiencias de tratamiento de residuos sólidos urbanos en India. *Residuos*, volumen 97 (número 3), 2007:24-30.
- Kurola J., Mona A., Kontro M., Talves M., Romantschuk, M. Wood Ash for Application in Municipal Biowaste Composting. *BioresourceTechnology*, volumen 102 (número 8), 2011:5214-5220.
- Li Z., Lu H., Ren L., He L. Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. *Chemosphere*, volume 93 (número 7), 2013:1247-1257.
- López M., Soliva M., Martínez-Farré F.X., Fernández M., Huerta-Pujol O. Evaluation of MSW organic fraction for composting: Separate collection or mechanical sorting. *Resources, Conservation and Recycling*, volumen 45 (número 4), 2010: 222-228.
- Lu Y. y Guo J. Effect of matured compost as a bulking agent and inoculating agent on composting of municipal solid waste, en: International Conference, (3rd, 2009, Beijing, China), Bioinformatics and Biomedical Engineering, IEEE Editors, 2009, pp. 1-4.
- Marmolejo L.F., Oviedo-Ocaña E.R., Jaimes J.C., Torres-Lozada P. Influencia de la separación en la fuente sobre el compostaje de residuos sólidos municipales. *Agronomía Colombiana*, volumen 28 (número 2), 2010: 319-328.
- Marmolejo L.F. *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 doctorado en ingeniería), Colombia, Universidad del Valle, 2011, 190 p.
- Odlare M., Arthurson V., Pell M., Svensson K., Nehrenheim E., Abubaker J. Land application of organic waste – Effects on the soil ecosystem. *Applied Energy*, volumen 88 (número 6), 2011: 2210-2218.
- OPS- Organización Panamericana de la Salud, BID- Banco Interamericano de Desarrollo, AIDIS- Asociación interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Informe Regional del Proyecto Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe, Estados Unidos, OPS, 2010, 120 p.
- Oviedo-Ocaña E.R. *Estrategias para la optimización del proceso y la calidad del producto del compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo*, (tesis doctorado en ingeniería), Colombia, Universidad del Valle, 2015, 141 p.
- Oviedo-Ocaña E.R., Daza-Torres M., Marmolejo-Rebellón L., Osorio-Ortiz A., Torres-Lozada P. Influencia de la incorporación de pasto estrella como material de soporte (*Cynodon Plectostachyus*) en el compostaje de biorresiduos de origen municipal. *Ingeniería y Desarrollo*, volumen 31 (número 2), 2013: 251-271.
- Oviedo-Ocaña E.R., Marmolejo-Rebellón L.F., Torres-Lozada P. Evaluation of the addition of wood ash to control the pH of substrates in municipal biowaste composting. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, volumen 15 (número 3), 2014a:469-478.
- Oviedo-Ocaña E.R., Marmolejo-Rebellón L.F., Torres-Lozada P. Influencia de la frecuencia de volteo para el control de la humedad de los sustratos en el compostaje de biorresiduos de origen municipal. *Revista internacional de contaminación ambiental*, volumen 30 (número 1), 2014b: 91-100.
- Oviedo-Ocaña E.R., Torres-Lozada P., Marmolejo-Rebellón L.F., Daza-Torres M., Torres-López W.A., Andrade M., Abonia-Gonzalez R. Evaluation of the variability of biowastes from small towns in developing countries. Starting point for improving their quality and composting process conditions. *Waste Management*, 2015a, en evaluación.
- Oviedo-Ocaña E.R., Marmolejo-Rebellón L.F., Torres-Lozada P., Daza M., Andrade M., Torres-López W.A., Abonia-Gonzalez R. Effect of adding bulking materials over the composting process of municipal solid biowastes. *Chilean Journal of Agriculture Research*, 2015b, en prensa.

- Oviedo-Ocaña E.R., Torres-Lozada P., Marmolejo-Rebellón L.F., Hoyos L.V., Gonzales S. Barrena R., Komilis D., Sanchez A. Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: Correlation among physical, chemical and biological indices. *Waste Management*, 2015c [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.034>
- Rosero E.P. *Evaluación de la aplicación de compost proveniente de biorresiduos del municipio de Versalles y residuos de poda de jardín en las propiedades químicas y biológicas de un suelo andisol y en la producción de maíz (zea mays)*, (tesis pregrado), Colombia, Universidad del Valle, 2013, 119 p.
- Saha J.K., Panwar N., Singh M.V. An assessment of municipal solid waste compost quality produced in different cities of India in the perspective of developing quality control indices. *Waste Management*, volumen 30 (número 2), 2010:192-201.
- Shekdar A.V. Sustainable solid waste management: An integrated approach for Asian countries. *Waste Management*, volumen 29 (número 4), 2009:1438-1448.
- Slater R.A., Frederickson J. Composting municipal waste in the UK: some lessons from Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, volumen 32 (número 3), 2001: 359-374.
- Smårs S., Gustafsson L., Beck-Friis B., Jönsson H. Improvement of the composting time for household waste during an initial low pH phase by mesophilic temperature control. *Bioresource Technology*, volumen 84 (número 3), 2002: 237-241.
- SSPD- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Diagnóstico sectorial. Plantas de aprovechamiento de residuos sólidos, Colombia, SSPD, 2008, 45 p.
- Soto J., Torres-Lozada P., Oviedo-Ocaña E.R., Marmolejo-Rebellón L.F., Zambrano P. Influencia del pH y nutrientes sobre la biodegradabilidad aerobia de biorresiduos de origen municipal. *Afinidad*, volumen 72 (número 572), 2015, en prensa.
- Stentiford E., De Bertoldi M. Composting process, en: Christensen T., *Solid Waste Technology & Management*, 1^{ra} ed., United Kingdom, Blackwell Publishing Ltd., 2010, pp 515-532.
- Sullivan D.M., Miller, R.O. Compost quality attributes, measurements and variability, en: Stoffella P.J., Kahn B.A. *Compost Utilization in Horticultural Cropping Systems*, 1^{ra} ed., Estados Unidos, Boca Raton, Lewis Publishers, 2001, pp. 95-120.
- Sundberg C., Navia T. Is there still a role for composting? *Waste Management & Research*, volumen 32 (número 6), 2014: 459-460.
- Troschinietz A., Mihelcic J. Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries. *Waste Management*, volumen 29 (número 2), 2009:915- 923.
- Vergara S.E., Tchobanoglous G. Municipal solid waste and the environment: a global perspective. *Annual Review of Environment and Resources*, volumen 37, 2012: 277-309.
- Wong J., Fung S., Selvam A. Coal fly ash and lime addition enhances the rate and efficiency of decomposition of food waste during composting. *Bioresource Technology*, volumen 100 (número 13), 2009:3324-3331.
- Zurbrügg C., Drescher S., Patel A., Sharatchandra H. Decentralised composting of urban waste – an overview of community and private initiatives in Indian cities. *Waste Management*, volumen 24 (número 7), 2004: 655-662.
- Zurbrügg C., Gfrerer M., Ashadi H., Brenner W., Küper D. Determinants of sustainability in solid waste management–The Gianyar Waste Recovery Project in Indonesia. *Waste Management*, volumen 32 (número 11), 2012: 2126-2133.

Este artículo se cita:

Citación estilo Chicago

Oviedo-Ocaña, Edgar Ricardo, Luis Fernando Marmolejo-Rebellon, Patricia Torres-Lozada. Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Lecciones desde Colombia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVIII, 01 (2017): 31-42.

Citación estilo ISO 690

Oviedo-Ocaña E.R., Marmolejo-Rebellón L.F., Torres-Lozada P. Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Lecciones desde Colombia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVIII (número 1), enero-marzo 2017: 31-42.

SEMLANZAS DE LOS AUTORES

Edgar Ricardo Oviedo-Ocaña. Ingeniero sanitario, magister y doctor en ingeniería por la Universidad del Valle. Es profesor asistente de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander e integrante del grupo de investigación Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH).

Luis Fernando Marmolejo-Rebellón. Ingeniero sanitario y doctor en ingeniería por la Universidad del Valle. Es profesor asociado en la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente de la Universidad del Valle. Asimismo, integrante del grupo de investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA).

Patricia Torres-Lozada. Ingeniera sanitaria, magister y doctora en ingeniería civil por la Universidad de Sao Paulo. Es profesora titular de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente de la Universidad del Valle e integrante del grupo de investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA).