

Composting of biowaste: Research trends and relevance in developing countries

Jonathan Soto-Paz ^a, Ricardo Oviedo-Ocaña ^b, Patricia Torres-Lozada ^a, Luis Fernando Marmolejo-Rebellón ^a
& Pablo Cesar Manyoma-Velásquez ^c

^a EIDENAR, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. jonathan.soto.paz@correounivalle.edu.co,
patricia.torres@correounivalle.edu.co, luis.marmolejo@correounivalle.edu.co

^b Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
eroviedo@uis.edu.co

^c Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. pablo.manyoma@correounivalle.edu.co

Received: December 13th, 2016. Received in revised form: October 10th, 2017. Accepted: October 25th, 2017.

Abstract

Biowaste is the main fraction of MSW in developing countries. Composting is a promising alternative for the management of biowaste in these contexts. However, its implementation has not been effective in developing countries, for which it is necessary to explore options to improve its application in this context. This article reviewed the research trends on biowaste composting and the potential application in developing countries such as Colombia. For this purpose, the technology monitoring methodology was used in databases of specialized scientific journals (period 2006 to 2017), using bibliometric tools such as RefViz® and Tlab®. The research has focused on optimizing the process through measures such as the use of amendment or support materials, strategies for reducing nitrogen losses, aerobic biodegradability studies and the development of empirical models to predict process conditions. The integration of this research in the context of developing countries can contribute to improve the application of biowaste composting.

Keywords: Resource recovery; biowastes; composting; product quality; modeling.

Compostaje de biorresiduos: Tendencias de investigación y pertinencia en países en desarrollo

Resumen

Los biorresiduos son la mayor fracción de los Residuos Sólidos Municipales-RSM en países en desarrollo, siendo el compostaje una alternativa promisoriosa para su gestión. La implementación del compostaje en este contexto no ha sido efectiva requiriéndose estrategias para mejorar su aplicación. Este artículo analiza tendencias investigativas del compostaje de biorresiduos y presenta una reflexión crítica al respecto. Para tal efecto, emplea elementos de vigilancia tecnológica, analizando revistas científicas especializadas (periodo 2006 a 2017) y usando herramientas bibliométricas como RefViz® y Tlab®. Las investigaciones para optimizar el proceso se han enfocado en el uso de materiales de enmienda o de soporte, estrategias para la reducción en las pérdidas de nitrógeno, desarrollo de estudios de biodegradabilidad aerobia y de modelos empíricos para predecir condiciones del proceso. La integración de estas investigaciones en el contexto de países en desarrollo puede contribuir al mejoramiento de la aplicación del compostaje de biorresiduos.

Palabras clave: Aprovechamiento; biorresiduos; compostaje; calidad del producto; modelado.

1. Introducción

En países en desarrollo, los biorresiduos se caracterizan por ser la fracción predominante de los RSM [1,2] y ser los de mayor complejidad de tratamiento en comparación con

otros residuos orgánicos, debido a aspectos asociados con sus características fisicoquímicas, tales como composición física heterogénea, alta humedad, presencia de sales, y deficiencia tanto de carbono orgánico y de nutrientes como el fósforo [3-9].

How to cite: Soto-Paz, J., Oviedo-Ocaña, R., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, F. and Manyoma-Velásquez, C., Compostaje de biorresiduos: Tendencias de investigación y pertinencia en países en desarrollo DYNA, 84(203), pp. 334-342, December, 2017.

Tradicionalmente, en países en desarrollo ha predominado la disposición final de los biorresiduos [10]; sin embargo, este método presenta mayores impactos ambientales asociados a la generación de gases de efecto invernadero-GEI y lixiviados, respecto a alternativas de aprovechamiento y valorización como el compostaje, la digestión anaerobia y el vermicompostaje [11-13].

El compostaje es de las tecnologías de mayor aplicación para el manejo de los biorresiduos en países en desarrollo, debido a aspectos como su bajo costo de inversión, operación sencilla y la generación de un producto de valor agregado cuyas propiedades fisicoquímicas y biológicas contribuyen a mejorar la disponibilidad de materia orgánica y nutrientes en el suelo [12, 14-18]. En el caso de Colombia, las plantas de compostaje de biorresiduos se han instalado principalmente en municipios con poblaciones menores a 15.000 habitantes (i.e. 78% de las instalaciones) y su implementación no ha sido efectiva [19] como consecuencia de inadecuados diseños, falencias operacionales y financieras, carencia de voluntad política y calidad objetable de biorresiduos y productos, situación similar a la reportada en otros países en desarrollo como Brasil, Etiopía, India y Malasia [5,8,20].

A pesar de que existe una amplia documentación en torno del compostaje de biorresiduos en países en desarrollo, los principales esfuerzos investigativos se enfocan en determinar el efecto de variables como aireación, humedad, relación C/N, tamaño de partícula, incorporación de inóculos y de materiales de enmienda o de soporte como estrategias para reducir el tiempo del proceso, hacerlo más eficiente y mejorar la calidad del producto [21,22]. Así mismo, autores como Li *et al.*[23], Komilis [24] y Oviedo-Ocaña *et al.*[25], resaltan que a pesar de desarrollarse numerosas investigaciones y avances en el campo del compostaje de biorresiduos, se presentan retos para mejorar la calidad del producto y ahondar en el conocimiento del proceso. Uno de los aspectos críticos en países en desarrollo está relacionado con la limitada calidad del producto generado al utilizar solo biorresiduos como sustrato, ya que generalmente no cumple con todos los estándares de calidad [5,8,26] ni satisface los requerimientos de los sistemas agroambientales en los que se emplea.

En este artículo se presentan las tendencias de investigación durante el periodo 2006-2017 en el campo de compostaje de biorresiduos a nivel mundial. Para tal efecto, se emplearon herramientas bibliométricas que son fundamentales para la captación de información, su análisis y toma de decisiones. A partir del análisis de la información, se desarrolla una reflexión crítica sobre las tendencias de investigación aplicables al contexto de países en desarrollo, que permitan optimizar el proceso y mejorar la calidad del producto del compostaje de biorresiduos.

2. Material y métodos

Se realizó una búsqueda sistemática de información en las bases de datos especializadas Scopus y Google Scholar, empleando las palabras clave: "Sustainability AND composting", "Biowaste OR Food Waste AND Composting", "Quality AND Composting", "composting AND climate change" and "use of food waste". Teniendo en

cuenta que el propósito era analizar tendencias actuales, se consideraron los artículos publicados a partir de enero de 2006 hasta septiembre de 2017.

La información obtenida de las ecuaciones de búsqueda fue procesada mediante los software RefViz® y Tlab® en versión libre; RefViz® se empleó para conformar galaxias con los 129 artículos resultantes de las ecuaciones de búsqueda; cada galaxia estuvo constituida por artículos que presentaban semejanza o proximidad entre sus palabras claves y permitían su compilación. Las galaxias fueron posteriormente agrupadas en grupos temáticos para determinar las tendencias de investigación; estos grupos se conformaron tomando como criterio aspectos convergentes o semejanzas en los temas abordados por cada galaxia. De otro lado, Tlab® se utilizó para establecer cuál de los grupos encontrados presentó mayor co-ocurrencia de palabras claves a través de la función coseno y determinar las tendencias investigativas de mayor importancia.

Para el análisis de la información, debido al considerable número de publicaciones, se seleccionaron 22 artículos de lectura obligatoria considerando dos criterios: número de citaciones e impacto del artículo. En el primer caso, se tuvo como referencia la frecuencia en el número de citaciones, revisándose aquellos con 22 o más citaciones. En el segundo caso, para artículos que no cumplían con el primer criterio (i.e. aquellos artículos publicados recientemente y que en el momento pueden no tener la frecuencia de citación propuesta), se realizó la lectura de los resúmenes y conclusiones y se seleccionaron aquellos que realizan una contribución aplicable al contexto de estudio.

Finalmente, se realizó una reflexión crítica sobre las tendencias de investigación identificadas y el potencial de aplicación en países en desarrollo como alternativas para la optimización del proceso. Para tal efecto, se tuvieron en cuenta las publicaciones específicas que muestran los resultados de aplicación del compostaje en países en desarrollo.

3. Resultados

3.1. Tendencias investigativas en compostaje de biorresiduos

Los biorresiduos representan entre el 30 y 40% de los RSM en países desarrollados, mientras que entre el 50 y 70% en países en desarrollo [27]. El manejo de los biorresiduos en algunos países en desarrollo se ha caracterizado por su disposición final en rellenos sanitarios o vertederos a cielo abierto [10,28,29] y además, ha representado costos significativos del servicio de aseo, que varían entre el 20% y 50% con poco o ningún valor obtenido de estas prácticas [30].

A pesar de la amplia investigación e implementación del compostaje como alternativa para el manejo de biorresiduos y para el control de la contaminación ambiental, tanto en países desarrollados [31] como en países en desarrollo [32,33] aún se realizan esfuerzos investigativos para analizar variables de proceso y profundizar en una mejor comprensión

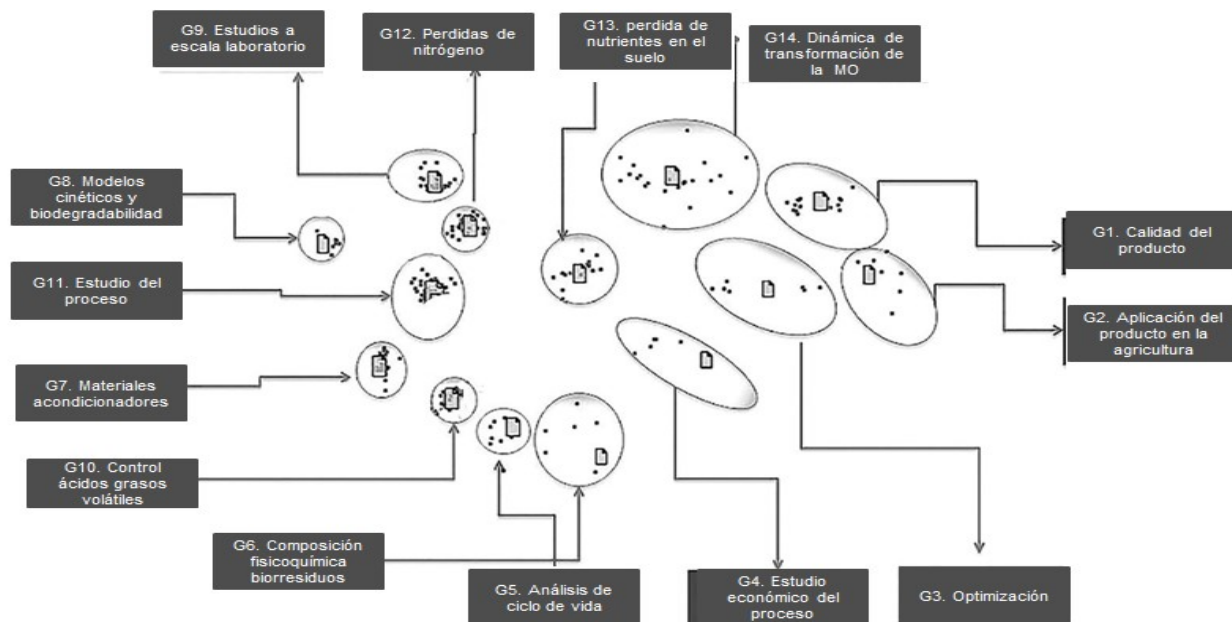


Figura 1. Tendencias investigativas en el compostaje de biorresiduos de origen municipal en el periodo 2006-2017.
 Nota: Una mayor proximidad entre los puntos de cada grupo significa mayor congruencia entre los temas abordados por cada grupo.
 Fuente: Elaboración propia con RefViz® versión libre.

de los fenómenos bioquímicos del proceso [22,31]. De acuerdo con Sundberg y Navia [34], los procesos de compostaje y de monitoreo han evolucionado a lo largo de los años, desde técnicas muy sencillas hasta niveles más complejos y efectivos. Los procesos de compostaje pueden incluir diseños específicos de reactores y aireación controles de suministro de agua y nutrientes, así como tratamiento de olores. Además, los procedimientos de monitoreo de compostaje incluyen actividades para medir la porosidad de los residuos orgánicos y las concentraciones de oxígeno durante el proceso. De igual manera, se utilizan métodos para monitorear la calidad del producto de compost, medido por índices de madurez y estabilidad.

En la década 2006 a 2017, los 129 artículos analizados muestran que el estudio de estas variables del proceso se ha complementado con otros tópicos de investigación como se muestra en la Fig. 1.

Se encontraron 14 galaxias en torno a las investigaciones sobre el proceso de compostaje de biorresiduos (Ver Fig. 1). De éstas, se conformaron cuatro grupos: i) calidad del producto; ii) control de contaminación ambiental; iii) modelos y optimización y iv) salida y usos del producto, cada uno de estos grupos se constituyen a partir de las semejanzas y consistencia temáticas que presentaron las galaxias (Ver Tabla 1).

El grupo 1 se relaciona con el mejoramiento de la calidad del producto y se caracteriza por tener el mayor número de publicaciones asociadas [35]. En éste se plantea el efecto de la composición fisicoquímica de los biorresiduos y el uso de materiales acondicionadores (enmienda o soporte) sobre el proceso [14,35]. De igual manera, se abordan estudios tendientes a mejorar la eficiencia de transformación de la materia orgánica carbonacea y nitrogenada a través de diferentes tasas aireación [36,38], rangos de temperatura de operación, modificaciones de pH del sustrato y del proceso [39].

Tabla 1.
 Agrupamiento de las galaxias en grupos.

Grupo	Galaxia	Número de publicaciones
1. Calidad del producto	G6: Composición fisicoquímica sustratos	3
	G7: Materiales acondicionadores (enmienda y/o de soporte)	29
	G11: Estudio de parámetros de proceso	23
2. Control de contaminación ambiental	G5: Análisis ciclo de vida	8
	G10: Emisión de compuestos orgánicos volátiles.	8
	G12: Pérdidas de nitrógeno en el proceso y generación de olor	12
3. Modelos y optimización	G13: Estudios de lixiviación de nutrientes y movilidad de metales en el suelo	7
	G8: Modelos cinéticos y biodegradabilidad	10
	G9: Estudios a escala de laboratorio	11
4. Salida y uso del producto	G3: Optimización del proceso	4
	G1: Usos del producto	5
	G2: Aplicación del producto en agricultura	4
	G4: Estudio económico	2
	G14: Dinámica de transformación del producto en el suelo	3

Nota: G: Galaxia
 Fuente: Elaboración propia

Uno de los aspectos a resaltar en el grupo 1 está relacionado con estudios para reducir los tiempos del proceso, a través del estudio de las tasas de biodegradación de los biorresiduos [40,41], incorporación de materiales de enmienda, de soporte o inóculos con la finalidad de determinar su efecto en el proceso y por ende en la calidad del producto final. Esto como consecuencia de que el compostaje de biorresiduos no ha sido efectivo en plantas de

compostaje de países en desarrollo como lo sugieren Oviedo-Ocaña *et al.* [19].

Respecto al grupo 2, se abordan temas relacionados con impactos ambientales asociados a la emisión de GEI y pérdida de potenciales nutrientes en el proceso como el nitrógeno. Esto se corrobora con el número de publicaciones relacionadas con el análisis de ciclo de vida-ACV de los biorresiduos (8 publicaciones) y con los estudios enfocados en minimizar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (8 publicaciones), líneas que han llamado la atención debido a la generación de olores, emisiones gaseosas e incidencia de las variables fisicoquímicas sobre el proceso [42-44].

El grupo 3 muestra que los estudios a escala de laboratorio (reactores con volúmenes entre 5L y 300 L con estrictas configuraciones para minimizar las pérdidas de calor, trampas de gases, cuantificadores de flujo de aire e instrumentos para la medición de oxígeno y dióxido de carbono) permiten simular el proceso de compostaje con cierta proximidad respecto de lo observado en estudios a escala real [15,45]. Este tipo de estudios brinda la oportunidad para analizar variables de interés en el proceso, minimizando los costos que podrían representar estudios a una mayor escala. Los resultados experimentales encontrados en estos ensayos, son usualmente contrastados con modelos cinéticos de biodegradación de la materia orgánica, generalmente basados en una cinética de orden uno [46], para calibrar variables de los modelos (Tasas de degradación del sustrato, tasa de consumo de oxígeno o de producción de dióxido de carbono, generación de nitritos y nitratos, emisión de compuestos orgánicos volátiles- COV y NH₃) y con ello intentar predecir el comportamiento que tendrá el proceso y la posible calidad del producto. En la actualidad se proponen modelos biológicos que consideran la ecuación de Monod y la participación de diferentes organismos implicados en el proceso [47], así como modelos fundamentados en balances de masa o energía en torno al proceso de compostaje [48, 49], no obstante, son pocos los estudios que consideran ambos tipos de modelos, entre ellos el propuesto por Sole *et al.* [50].

Finalmente, el grupo 4 está directamente relacionado con los usos potenciales del producto en sistemas agroambientales. Uno de los criterios de calidad del producto se relaciona con la estabilidad del material, el cual se puede determinar a través de pruebas respirométricas (i.e. Índice de la Respiración Dinámico-DRI₂₄, Índice de Generación Dinámica Acumulativa de CO₂-CRI; Cociente Respiratorio-RQp), las cuales han sido ampliamente aplicadas y aceptadas [51,52].

De otro lado, otro criterio de calidad es la madurez del producto, que se ha determinado a partir de variables como pH, conductividad eléctrica, la relación de absorbancia (con diferente longitud de onda) y los ensayos de fitotóxicidad con semillas de rápida germinación [53] que se caracterizan por presentar una buena aproximación a los potenciales efectos inhibitorios para el crecimiento de las plantas [24,54]. No obstante, en la literatura se resalta la necesidad de ahondar en el desarrollo de técnicas estandarizadas para caracterizar la calidad del producto ya sea a través de métodos físicos, químicos, o biológicos como lo sugiere Komilis *et al.* [24]. Respecto a esto, Luo *et al.*[55] resaltan la necesidad de

ahondar en el estudio de la madurez del producto final mediante la estandarización de pruebas de germinación, para lo cual sugieren estandarizar el tipo de semillas a emplear (semillas que sean sensibles a cambios en la concentración de compuestos fitotóxicos); el número de semillas utilizadas (basados en la probabilidad binomial, la germinación de una semilla incrementa conforme su número en una caja de Petri sea mayor) a fin de no obtener resultados que dificulten su comparación con otros estudios; la reducción de interferencias por la humedad de la muestra tomada en diferentes tiempos de proceso así como también, el desarrollo de técnicas simplificadas que puedan ser implementadas *in situ* en las plantas de compostaje de pequeña escala [19]. De otro lado, Van Fan *et al.* [56] han considerado también esta disyuntiva analizando que parámetros son relevantes para caracterizar el producto final, encontrando correlaciones entre parámetros que tienen un grado de complejidad superior y de mayor costo (i.e. ácidos húmicos y fúlvicos, cuantificación de carbono soluble en agua, actividad enzimática) respecto a otros de menor complejidad (i.e. sólidos volátiles, cuantificación de oxígeno y dióxido de carbono, materia orgánica, pH, contenido de nutrientes, color, olor entre otros) proponiendo la medición de estos parámetros a fin de que ofrezcan una información aproximada que permita la toma de decisiones en instalaciones de compostaje.

Teniendo en cuenta la variabilidad en la calidad del producto en las plantas de compostaje, una tendencia emergente para el análisis de la calidad del producto compete a la aplicación de la Teoría de Conjuntos Difusos [57], como un estrategia para clasificar el producto acorde con sus características y para potenciar la selección de sistemas agroambientales.

Si bien la mejora de la calidad del producto final es uno de los puntos de investigación en el compostaje de biorresiduos, este tópico está relacionado también con aspectos económicos y por ende con la sostenibilidad financiera de las plantas de compostaje (galaxia G4). En la actualidad, un estudio de Proietti *et al.* [58], revela la importancia de mejorar la calidad del producto final a través de la optimización del grado de mezcla entre el sustrato con materiales de enmienda o de soporte, para lo cual recomienda una adecuada selección de los materiales a fin de maximizar la calidad del producto y minimizar costos de adquisición y operación en las plantas. Aunque el funcionamiento de las plantas de compostaje varía dependiendo del tipo de tecnología empleada (i.e. aireación forzada o por volteo manual, proximidad y accesibilidad de materiales a la instalación), y por consiguiente su situación financiera, los esquemas de aprovechamientos en las plantas deben ser flexibles en términos de recursividad, resiliencia y apoyarse en estudios que optimicen el proceso y trate de mantener una calidad del producto que garantice su salida.

3.2. Análisis de las tendencias de investigación más estudiadas en el Compostaje de biorresiduos

A partir de los estudios para el compostaje de biorresiduos en países en desarrollo, se encontró que la calidad del producto final y la optimización del proceso son

las tendencias más estudiadas en la última década (Ver Fig. 2A). Esto puede estar asociado a que en diferentes países en desarrollo (e.g. Brasil, Colombia, Ecuador, México, Nigeria, India), el producto derivado solamente del compostaje de biorresiduos presenta características fisicoquímicas que limitan su uso y comercialización (i.e. mejorador de suelos), tales como elevado contenido de material inerte y conductividad eléctrica, pH alcalino y concentraciones limitadas de nutrientes que le restan valor agronómico [25]. Estas características hacen que el producto presente restricciones y no cumpla con los valores mínimos requeridos de algunos parámetros en los estándares o guías de calidad de la Comunidad Europea [59] o normativas latinoamericanas (i.e. Australian Standar; Guideline of The Fertilizer Order 1985; NADF-020-AMBT-2011; NCh2880; NBR 13591; NTC 5167).

Diferentes experiencias [5,19,26,60] en plantas de compostaje de biorresiduos de países en desarrollo, resaltan la importancia de mejorar el proceso a través de la evaluación de estrategias que se ajusten mejor a cada contexto (i.e. materiales de enmienda o de soporte, aireación, tamaño de partícula), lo hagan más eficiente en términos de biodegradación y maximice el contenido de nutrientes en el producto. Sin embargo, debido a factores como la variabilidad en las características fisicoquímicas de los biorresiduos y en las condiciones operacionales del proceso, las plantas requieren de un periodo prolongado (entre dos y seis meses) para alcanzar la estabilidad y madurez del producto [40,41], incidiendo en la extensión de las plantas de compostaje, las cuales en algunos casos, no han sido concebidos para estos tiempos de proceso [61].

La Fig. 2B muestra la co-ocurrencia de las palabras claves en torno a la calidad del producto final y la Fig. 2C, presenta las palabras que guardan relación con la optimización del proceso. La proximidad entre las palabras claves respecto a "optimización" y "calidad del producto" indican una mayor frecuencia de co-ocurrencia. En el caso contrario, la lejanía entre las palabras muestra que son aspectos que tienen baja relación con la tendencia a analizar.

El análisis de co-ocurrencias de las Figs. 2B y 2C muestran que están directamente relacionados, dado que una optimización en el proceso puede generar una mejora en la calidad del producto. Se observa que el uso de diferentes materiales acondicionadores en el compostaje de biorresiduos es uno de los temas más investigados, ya sea para la bioestimulación de los microorganismos a través del incremento de la disponibilidad de nutrientes o a través de la mejora en la estructura física de la pila para facilitar el intercambio de gases en la matriz sólido-líquida-gaseosa [62,63].

Los materiales más empleados en el compostaje de biorresiduos (Ver Fig. 3), corresponden a los residuos verdes y al aserrín que se caracterizan por aportar nutrientes como carbono o nitrógeno y soporte estructural. Otros materiales como la cascarilla de arroz, virutas de madera y el compost también han sido utilizados presentando bondades y limitaciones tanto en el desarrollo del proceso como en la calidad del producto. En menor proporción se emplean insumos químicos cuyo propósito es acondicionar el pH del sustrato y del proceso. Li *et al.* [23] resaltan la importancia de definir condiciones de mezcla óptima a fin de

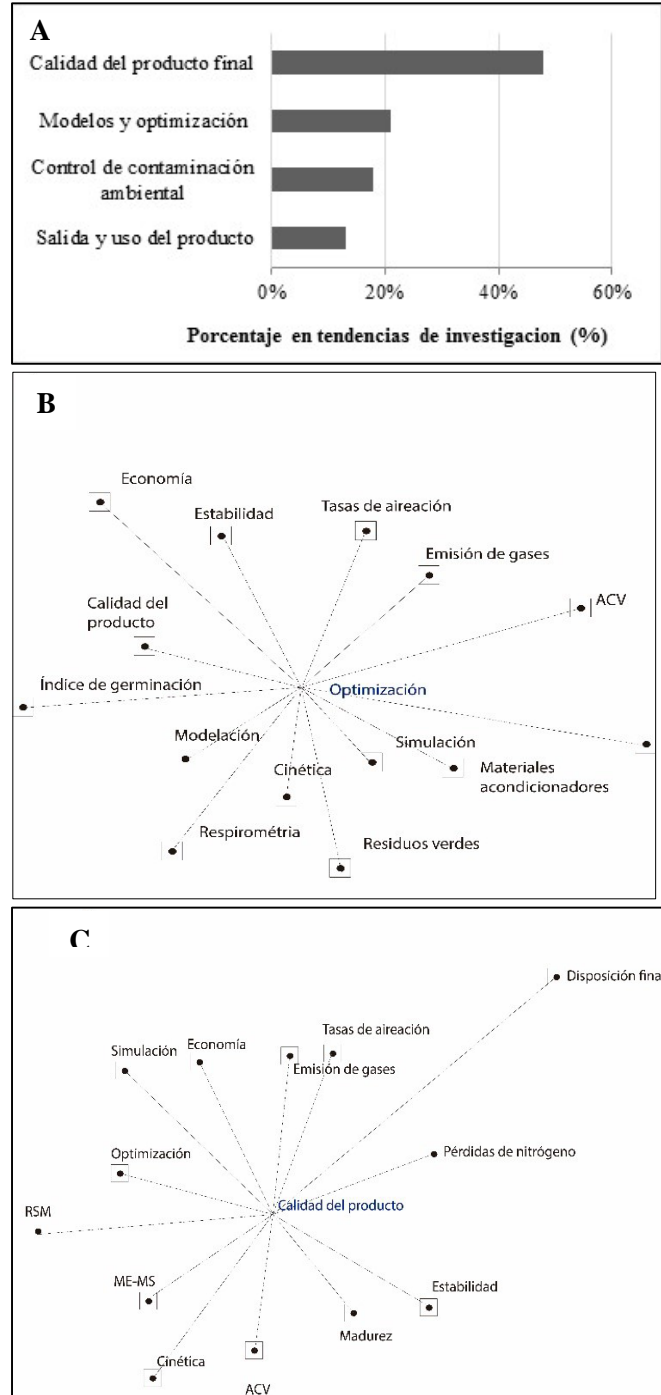


Figura 2. A Tendencias en la investigación del compostaje de BOM durante el 2006 al 2016. B Co-ocurrencias de palabras en torno a la optimización del proceso. C Co-ocurrencias de palabras en torno a la calidad del producto final. Fuente: elaboración propia.

maximizar calidad y minimizar costos de adquisición y operación en las plantas. Aspecto que se resalta en la Fig. 2B, dado que una de las prioridades en las plantas de compostaje de países en desarrollo, dadas sus características económicas, debe ser la sostenibilidad ambiental y financiera, lo cual implica la selección de materiales acondicionadores a bajo costo y fácil manipulación por parte de los operarios de las plantas.

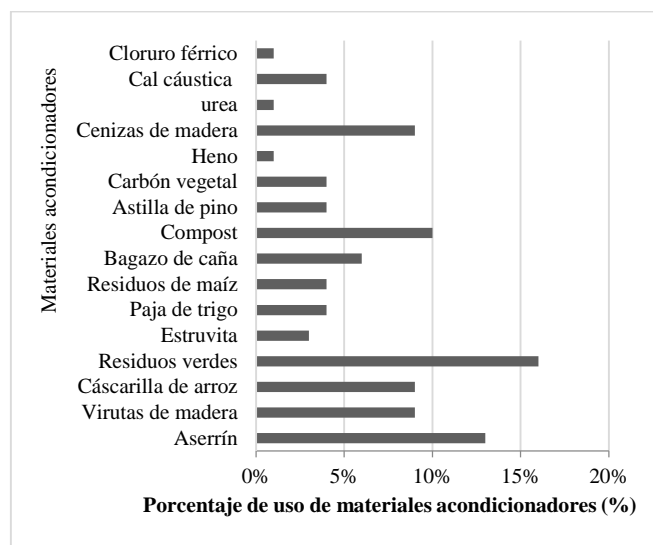


Figura 3. Frecuencia porcentual de materiales de enmienda y soporte más utilizados para el compostaje de biorresiduos reportados en 74 estudios. Fuente: elaboración propia.

Para ello, la selección de los materiales puede involucrar herramientas del análisis multicriterio para el apoyo en la toma de decisiones [64] y potencializar efectos sinérgicos en el proceso; este aspecto ha sido abordado en la selección de potenciales materiales para el aprovechamiento de biorresiduos en plantas de compostaje que han mostrado que la selección adecuada contribuye a mejorar la calidad del producto [19].

Pese a que el empleo de diferentes materiales puede mejorar la calidad del producto final, aún existen limitaciones para hacerlo competitivo frente otros productos mejoradores de suelo y fertilizantes. En países como Brasil y Colombia en el contexto latinoamericano, experiencias reportadas por Barreira [5], Marmolejo [61] y Oviedo-Ocaña [19] subrayan que el producto cumple con los estándares de calidad con la incorporación de materiales de acondicionamiento, pero aún se requieren investigaciones que permitan maximizar la calidad del producto.

De otro lado, la pérdida de nitrógeno en el proceso, principalmente en forma de amoníaco, es uno de los temas más abordados en las investigaciones debido a su relación con la calidad del producto y a las emisiones de NO_x que se relacionan con los GEI [65]. Como alternativa para mejorar la calidad del producto final, los ensayos de escala de laboratorio pueden indicar si las opciones que se pretendan evaluar pueden ofrecer resultados satisfactorios en términos de biodegradabilidad o si por el contrario podrían afectar el proceso.

Una estrategia adicional para la optimización del proceso se fundamenta en el desarrollo y aplicación de algoritmos genéticos o modelos polinomiales empíricos que tratan de simular el proceso con un alto nivel de confianza. Sin embargo, pocos estudios han considerado la optimización numérica con la finalidad de definir las condiciones más adecuadas para el proceso en términos de humedad, aireación y disponibilidad de nutrientes, y no siempre se realizan respecto a los biorresiduos sino a otros residuos como los

lignocelulíticos [66]. Los estudios relacionados con los biorresiduos se enfocan principalmente en la minimización de COV's y pocos se han centrado en maximizar las tasas de biodegradación [4,66]. Esto muestra un campo promisorio de investigación, que incluyen el uso de algoritmos genéticos o redes neuronales como una manera de reproducir datos a partir de ensayos experimentales y utilizar funciones objetivo que permitan definir las condiciones óptimas del proceso.

4. Discusión

4.1. Algunas reflexiones sobre las tendencias del proceso de compostaje de biorresiduos en países en desarrollo

El proceso de compostaje de biorresiduos ha mostrado avances en la última década respecto a las investigaciones precedentes, las cuales se centraban en definir las condiciones adecuadas para el desarrollo del proceso. Estos avances investigativos han estado enfocados en la identificación de alternativas para mejorar el proceso y la calidad del producto, analizando la incidencia independiente de cada parámetro sobre la evolución del proceso. En contraste, pocos estudios han considerado el efecto conjunto del ajuste de diferentes parámetros (i.e. aireación, relación C/N, humedad) que ayuden a comprender la dinámica del proceso con una mayor aproximación [42-44]. El desarrollo de este tipo de investigaciones, soportados en estudios cinéticos del proceso y en la incorporación de herramientas como las redes neuronales o algoritmos genéticos, pueden contribuir a la construcción de modelos empíricos que describan el comportamiento del proceso, predecir calidad del producto y definir las condiciones operacionales más adecuadas.

Respecto al desarrollo y aplicabilidad de modelos matemáticos para la simulación del proceso, gran parte de éstos presentan variabilidad en sus algoritmos y en muchos casos no consideran todos los organismos que intervienen en el proceso como consecuencia de su complejidad. Baptista *et al.* [49] recomiendan comparar los datos obtenidos a escala de laboratorio con su respectiva simulación con los resultados obtenidos a escala de campo, para comparar las incertidumbres obtenidas en las dos escalas y analizar cómo se restringe el error.

Otro factor en el que se ha evidenciado variabilidad es en la duración de los ensayos a escala de laboratorio, pues se reportan periodos que varían de horas [67] a días [15, 68]. De acuerdo con de Guardia *et al.* [37] la mayor parte de la degradación de la materia orgánica biodegradable se lleva a cabo durante las primeras fases del proceso mientras que compuestos de lenta degradación, requiere prolongar el ensayo hasta completar su degradación y alcanzar su estabilidad. Algunos autores [69] proponen suspender el ensayo cuando la tasa de producción de dióxido de carbono sea equivalente o inferior al 5% del volumen total producido hasta ese momento. Estos dos indicadores han mostrado ser fundamentales para la clasificación del producto final en términos de estabilidad y se han validado en el manejo de otro tipo de residuos como los lodos provenientes de sistemas de

tratamiento de aguas residuales [52]. No obstante, estos indicadores pueden ser complementados con otros de naturaleza fisicoquímica tales como la relación ácidos húmicos/ fúlvicos y mineralización de carbono y nitrógeno.

Acorde con las tendencias de investigación expuestas se presentan oportunidades de investigación en países en desarrollo como Colombia, donde aún el compostaje es una tecnología incipiente. Para esto, es fundamental profundizar en la caracterización fisicoquímica de los biorresiduos debido su variabilidad espacial y temporal [8] y analizar el efecto de esta variación, en la duración del proceso y calidad del producto. De igual manera, el conocimiento de la calidad de los biorresiduos resulta importante para la selección de ME y/o MS que puedan suplir las limitantes nutricionales de los biorresiduos. En este aspecto, la aplicación de herramientas multicriterio y sistemas de información geográfica, pueden contribuir a mejorar el proceso de selección de estos materiales con el mayor beneficio técnico, ambiental y económico.

El campo de la simulación del proceso de compostaje de biorresiduos es un reto a considerar en Colombia; la generación de modelos usando inteligencia artificial a través de lógica difusa, redes neuronales, algoritmos genéticos u otros métodos heurísticos, podrían permitir la optimización del proceso y la calidad del producto final a través de la definición de las condiciones operativas más adecuadas y el ME y/o MS más idóneo obtenidos aplicando las herramientas multicriterio.

Finalmente, es necesario evaluar la calidad del producto desde diferentes perspectivas: biológicas (indicadores microbiológicos, de estabilidad y de madurez), físicas (densidad, retención de agua, conductividad eléctrica), químicas (pH, capacidad de intercambio catiónico, nutrientes, materia orgánica) y agronómicas; ésta última tiene incidencia directa sobre los potenciales usos del producto final. Investigaciones tendientes al mejoramiento de la calidad son fundamentales debido a que definen el mercadeo y la comercialización del producto y por consiguiente, la sostenibilidad financiera de las plantas de compostaje. Adicionalmente, debe profundizarse en estudios que muestren la relación aplicación de productos y suelos, considerando los problemas de agotamiento de la materia orgánica de los suelos en el contexto colombiano [70].

5. Conclusiones

Este trabajo mostró la prioridad de mejorar la calidad del producto obtenido del compostaje de biorresiduos de países en desarrollo, para lo cual son fundamentales estudios de optimización del proceso y de definición de indicadores estandarizados de la calidad del producto final, que favorezcan la obtención de resultados confiables, reproducibles y comparables entre diferentes investigaciones. Algunas propuestas que se plantean como aporte son: *i.* Incorporar herramientas para la selección de materiales acondicionadores que consideren múltiples criterios y estén sujetas al contexto que permitan obtener un efecto sinérgico sobre el proceso (materiales con características fisicoquímicas complementarias a los biorresiduos) y conduzcan a su optimización; *ii.* Realizar

ensayos a escala laboratorio en conjunto con la aplicación de modelos cinéticos dinámicos para la simulación del proceso a partir de datos experimentales, y con ello, determinar potenciales acciones correctivas; *iii.* Optimización del proceso de compostaje a partir de redes neuronales o desarrollo de modelos empíricos que permitan definir las condiciones más adecuadas y mejoren la calidad del producto final; *iv.* realizar estudios de viabilidad económica en plantas de compostaje articulados con la optimización del proceso.

Finalmente, se resalta la necesidad de redefinir aspectos normativos de la calidad del producto final, que pueden estar orientados a establecer estándares de calidad en función de los posibles usos del producto. Así mismo, podría considerar las condiciones de contexto por las diferencias fisicoquímicas que presentan los biorresiduos entre regiones geográficas

Agradecimientos

Los autores desean expresar sus agradecimientos por el apoyo financiero al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Investigación – COLCIENCIAS a través de las convocatorias 727 de 2015 para financiación de los estudios de doctorado nacionales otorgada a Ing. Jonathan Soto Paz. E.R y al proyecto con C. I. 2962 de la Universidad del Valle. Oviedo-Ocaña agradece a la Universidad Industrial de Santander por el soporte para la escritura de este artículo.

Referencias

- [1] Aalok, A., Tripathi, A. and Soni, P., Vermicomposting: a better option for organic solid waste management. *J. Hum. Ecol.*, 24(1), pp. 59-64, 2008.
- [2] Thi, N.B.D., Kumar, G. and Lin, C.-Y., An overview of food waste management in developing countries: Current status and future perspective. *Journal of Environmental Management*, 157, pp. 220-229, 2015. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.04.022.
- [3] Wang, H. and Nie, Y.M. s.w.c.a.m.i.C., Municipal solid waste characteristics and management in China. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51, pp. 250-263, 2001. DOI: 10.1080/10473289.2001.10464266
- [4] Kumar, M., Ou, Y.-L. and Lin, J.-G. Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. *Waste Management*, 30 (4), pp. 602-609, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.11.023.
- [5] Barreira, L.P., Philippi Junior, A. and Rodrigues, M.S., Usinas de compostagem do Estado de São Paulo: qualidade dos compostos e processos de produção. *Eng. Sanit. Ambient*, 11(4), pp. 385-393, 2006.
- [6] Zhang, R., El-Mashad, H.M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C. and Gamble, P., Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 98(4), pp. 929-935, 2007. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.02.039.
- [7] Sitorus, B., Sukandar, S. and Panjaitan, S., Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit -vegetable wastes. *Energy Procedia*, 32, pp. 176-182, 2013. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.023
- [8] Faverial, J., Boval, M., Sierra, J. and Sauvart, D., End-product quality of composts produced under tropical and temperate climates using different raw materials: A meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 183(Pt3), pp. 909-916, 2016. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.09.057
- [9] Götze, R., Boldrin, A., Scheutz, C. and Astrup, T.F., Physico-chemical characterisation of material fractions in household waste: Overview of data in literature. *Waste Management*, 49, pp. 3-14, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.01.008.

- [10] Noguera, K. y Olivero, J., Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: Caso colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(132), pp. 347-356, 2010.
- [11] De Feo, G., De Gisi, S. and Williams, I.D., Public perception of odour and environmental pollution attributed to MSW treatment and disposal facilities: A case study. *Waste Management*, 33(4), pp. 974-987, 2013. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.12.016.
- [12] Saer, A., Lansing, S., Davitt, N.H. and Graves, R.E., Life cycle assessment of a food waste composting system: Environmental impact hotspots. *Journal of Cleaner Production*, 52, pp. 234-244, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.03.022
- [13] Bernstad-Saraiva-Schott, A., Wenzel, H. and La Cour-Jansen, J., Identification of decisive factors for greenhouse gas emissions in comparative life cycle assessments of food waste management - An analytical review. *Journal of Cleaner Production*, 119, pp. 13-24, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.079.
- [14] Adhikari, B., Barrington, S., Martinez, J. and King, S., Characterization of food waste and bulking agents for composting. *Waste Management*, 28(5), pp. 795-804, 2008. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.08.018.
- [15] Lashermes, G., Barriuso, E., Le Villio-Poitrenaud, M. and Houot, S., Composting in small laboratory pilots: Performance and reproducibility. *Waste Management*, 32(2), pp. 271-277, 2012. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.011
- [16] Coelho, C., Cavani, L., Halle, A.t., Guyot, G., Ciavatta, C. and Richard, C., Rates of production of hydroxyl radicals and singlet oxygen from irradiated compost. *Chemosphere*, 85(4), pp. 630-636, 2011. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.07.007.
- [17] Wu, T.Y., Lim, S.L., Lim, P.N. and Shak, K.P.Y., Biotransformation of biodegradable solid wastes into organic fertilizers using composting or/and vermicomposting. 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2014 (JJ Klemes (HU) 23 August 2014 to 27 August 2014): The Italian Association of Chemical Engineering; 2014. pp. 1579-1584.
- [18] Abu-Bakar, R.b., Froome, C., Elwan, A., Arief, Y.Z., Adzis, Z. and Muhamad, N.A., 2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA) 2014, Sustainable Energy for Green Mobility/Life Cycle Assessment-based Environmental Impact Comparative Analysis of Composting and Electricity Generation from Solid Waste. *Energy Procedia*, 68, pp. 186-194, 2015. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.03.247.
- [19] Oviedo, R., Marmolejo, L. and Torres, P., Advances in research on biowaste composting in small municipalities of developing countries. Lessons from Colombia. *Revista Ingenieria Investigacion y Tecnologia*, 18(1), pp. 31-42, 2017.
- [20] Jara-Samaniego, J., Pérez-Murcia, M.D., Bustamante, M.A., Pérez-Espinosa, A., Paredes, C., López, M., López-Lluch, D.B., Gavilanes-Terán, I. and Moral, R., Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: Suitability of the obtained composts for seedling production. *Journal of Cleaner Production*, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.178.
- [21] Diaz, L.F.S.G., Diseño de sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos en localidades menores a 50.000 habitantes. Foro – Taller. Corporación Autónoma Regional del Quindío – CRQ, UNICEF y Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2008.
- [22] Stentiford, E. and de Bertoldi, M., Composting process, in: Christensen, T., *Solid Waste Technology & Management*, Ira Ed., United Kingdom, Blackwell Publishing Ltd., 2010, pp 515-532.
- [23] Li, Z., Lu, H., Ren, L. and He, L., Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. *Chemosphere*, 93(7), pp. 1247-1257, 2013. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.06.064.
- [24] Komilis, D.P., Compost quality: Is research still needed to assess it or do we have enough knowledge? *Waste Management*, 38, pp. 1-2, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.01.023.
- [25] Oviedo, E., Dominguez, I., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L., Komilis, D. and Sanchez, A., A qualitative model to evaluate biowaste composting management systems using causal diagrams: A case study in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 133, pp. 201-211, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.115.
- [26] Saha, J., Panwar, N. and Singh, M., An assessment of municipal solid waste compost quality produced in different cities of India in the perspective of developing quality control indices. *Waste Management*, 30(2), pp. 192-201, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.041.
- [27] Hoornweg, D. and Bhada-Tata, I.P., What a waste: A global review of solid waste management. Washington DC, USA, Urban Development Series Knowledge Papers No. 15. The World Bank, 2012.
- [28] Aleluia, J. and Ferrão, P., Characterization of urban waste management practices in developing Asian countries: A new analytical framework based on waste characteristics and urban dimension. *Waste Management*, 58, pp. 415-429, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.05.008.
- [29] Henry, R.K., Yongsheng, Z. and Jun, D., Municipal solid waste management challenges in developing countries—Kenyan case study. *Waste management*, 26(1), pp. 92-100, 2006. DOI: 10.1016/j.wasman.2005.03.007
- [30] Mundial, B., Municipal solid waste: Turning a problem into resource 2014.
- [31] Golueke, C.G., Understanding the process. *The Biocycle Guide to the art and science of composting*. The JG Press, Inc. Emmans, PA, USA, 1991, pp. 14-27.
- [32] Slater, R. and Frederickson, J., Composting municipal waste in the UK: Some lessons from Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, 32(3), pp. 359-374, 2001. DOI: 10.1016/S0921-3449(01)00071-4
- [33] Golueke, C. and Diaz, L., Historical review of composting and its role in municipal waste management. *The science of composting*, Springer, 1996, pp. 3-14.
- [34] Sundberg, C. and Navia, T., Is there still a role for composting?. *Waste Management & Research* 32(6), pp. 459-460, 2014. DOI: 10.1177/0734242X14536094
- [35] Chang, J.I. and Chen, Y.J., Effects of bulking agents on food waste composting. *Bioresource Technology*, 101(15), pp. 5917-5924, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.02.042.
- [36] Evangelou, A.C., Chintzios, V.T. and Komilis, D.P., Effect of aeration rate on the respiration activity of the fresh organic fraction of municipal solid wastes. *EurAsia Waste Management Symposium*, 2-4 May 2016, YTU 2010 Congress Center, İstanbul/Türkiye, 2016.
- [37] de Guardia, A., Mallard, P., Teglia, C., Marin, A., Le Pape, C., Launay, M., Benoist, J.C. and Petiot, C., Comparison of five organic wastes regarding their behaviour during composting: Part 1, Biodegradability, stabilization kinetics and temperature rise. *Waste Management*, 30(3), pp. 402-414, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.10.019
- [38] Almeida, N., Komilis, D., Barrena, R., Gea, T. and Sánchez, A., The importance of aeration mode and flowrate in the determination of the biological activity and stability of organic wastes by respiration indices. *Bioresource Technology*, 196, pp. 256-262, 2015. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.07.102.
- [39] Sundberg, C. and Jönsson, H., Higher pH and faster decomposition in biowaste composting by increased aeration. *Waste Management*, 28(3), pp. 518-526, 2008. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.01.011
- [40] Awasthi, M.K., Pandey, A.K., Khan, J., Bundela, P.S., Wong, J.W. and Selvam, A., Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. *Bioresource Technology*, 168, pp. 214-221, 2014. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.01.048
- [41] Patidar, A., Gupta, R. and Tiwari, A., Integrated composting and vermicomposting: A boon to industry for waste clearance. *International Journal of Environment and Waste Management*, 13(3), pp. 274-290, 2014. DOI: 10.1504 / IJEW.2014.059933.
- [42] Scaglia, B., Orzi, V., Artola, A., Font, X., Davoli, E., Sanchez, A. and Adani, F., Odours and volatile organic compounds emitted from municipal solid waste at different stage of decomposition and relationship with biological stability. *Bioresource technology*, 102(7), pp. 4638-4645, 2011. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.01.016.
- [43] Pagans, E., Font, X. and Sánchez, A., Emission of volatile organic compounds from composting of different solid wastes: Abatement by biofiltration. *Journal of Hazardous Materials*, 131(1), pp. 179-186, 2006. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.09.017.

- [44] Sánchez, A., Artola, A., Font, X., Gea, T., Barrena, R., Gabriel, D., Sánchez-Monedero, M., Roig, A., Cayuela, M. and Mondini, C., Greenhouse gas emissions from organic waste composting. *Environmental Chemistry Letters*, 13(3), pp. 223-238, 2015. DOI: 10.1007/s10311-015-0507-5.
- [45] Petiot, C. and De Guardia, A., Composting in a laboratory reactor: a review. *Compost Science & Utilization*, 12(1), pp. 69-79, 2004. DOI: 10.1080/1065657X.2004.10702160
- [46] Evangelou, A., Calabrò, P.S., Greco, R., Sánchez, A. and Komilis, D., Biodegradation activity of eight organic substrates: A correlation study of different test methods. *Waste and biomass valorization*, 2016, pp. 1-14. DOI: 10.1007/s12649-016-9532-2.
- [47] Denes, J., Tremier, A., Menasserri-Aubry, S., Walter, C., Gratteau, L. and Barrington, S., Numerical simulation of organic waste aerobic biodegradation: A new way to correlate respiration kinetics and organic matter fractionation. *Waste Management*, 36(0), pp. 44-56, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.11.013.
- [48] Zhang, Y., Lashermes, G., Houot, S., Doublet, J., Steyer, J.P., Zhu, Y.G., Barriuso, E. and Garnier, P., Modelling of organic matter dynamics during the composting process. *Waste Management*, 32(1), pp. 19-30, 2012. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.008.
- [49] Baptista, M., Silveira, A. and Antunes, F., Theoretical analysis of the kinetic performance of laboratory-and full-scale composting systems. *Waste Management & Research*, 30(7), pp. 700-707, 2012.
- [50] Sole-Mauri, F., Illa, J., Magrí, A., Prenafeta-Boldú, F. and Flotats, X., An integrated biochemical and physical model for the composting process. *Bioresource Technology*, 98(17), pp. 3278-3293, 2007. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.07.012.
- [51] Barrena, R., Vázquez, F. and Sánchez, A., The use of respiration indices in the composting process: A review. *Waste Management & Research*, 24, pp. 37-47, 2006. DOI: 10.1177/0734242X06062385.
- [52] Ponsá, S., Gea, T. and Sánchez, A., Different indices to express biodegradability in organic solid wastes. *Waste Management*, 39(2), pp. 706-712, 2010. DOI: 10.2134/jeq2009.0294.
- [53] Yuan, J., Chadwick, D., Zhang, D., Li, G., Chen, S., Luo, W., Du, L., He, S. and Peng, S., Effects of aeration rate on maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting. *Waste Management*, 56, pp. 403-410, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.07.017.
- [54] Komilis, D.P. and Tziouvaras, I.S., A statistical analysis to assess the maturity and stability of six composts. *Waste Management*, 29(5), pp. 1504-1513, 2009. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.10.016
- [55] Luo, Y., Liang, J., Zeng, G., Chen, M., Mo, D., Li, G. and Zhang, D., Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects. *Waste Management*, 2017. DOI: DOI: 10.1016/j.wasman.2017.09.023.
- [56] Van Fan, Y., Lee, C.T., Klemeš, J.J., Bong, C.P.C. and Ho, W.S., Economic assessment system towards sustainable composting quality in the developing countries. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(8), pp. 2479-2491, 2016. DOI: 10.1007/s10098-016-1209-9.
- [57] Zhang, Y.M., Huang, G.H., He, L. and Li, Y.P., Quality evaluation for composting products through fuzzy latent component analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), pp. 1132-1140, 2008. DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.05.003.
- [58] Proietti, P., Calisti, R., Gigliotti, G., Nasini, L., Regni, L. and Marchini, A., Composting optimization: Integrating cost analysis with the physical-chemical properties of materials to be composted. *Journal of Cleaner Production*, 137, pp. 1086-1099, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.158.
- [59] Cesaro, A., Belgiorno, V. and Guida, M., Compost from organic solid waste: Quality assessment and European regulations for its sustainable use. *Resources, Conservation and Recycling*, 94(0), pp. 72-79, 2015. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.11.003.
- [60] Ekelund, L. and Nyström, K., Composting of municipal waste in South Africa. *Sustainability aspects Uppsala Universitet*, Sweden, 2007.
- [61] Marmolejo, L., Marco conceptual para el aprovechamiento en plantas de manejo de residuos sólidos de poblaciones menores a 20.000 habitantes del Norte del Valle del Cauca, Colombia. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2011.
- [62] Gabhane, J., William, S., Bidyadhar, R., Bhilawe, P., Anand, D., Vaidya, A. and Wate, S., Additives aided composting of green waste: Effects on organic matter degradation, compost maturity, and quality of the finished compost. *Bioresource Technology*, 114, pp. 382-388, 2012. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.02.040
- [63] Yang, F., Li, G.X., Yang, Q.Y. and Luo, W.H., Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. *Chemosphere*, 93(7), pp. 1393-1399, 2013. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.07.002.
- [64] Escalante, H., Castro, L., Gauthier-Maradei, P. and Rodríguez-de la Vega, R., Spatial decision support system to evaluate crop residue energy potential by anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 219, pp. 80-90, 2016. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.06.136.
- [65] de Guardia, A., Mallard, P., Teglia, C., Marin, A., Le Pape, C., Launay, M., Benoist, J.C. and Petiot, C., Comparison of five organic wastes regarding their behaviour during composting: Part 2, Nitrogen dynamic. *Waste Management*, 30(3), pp. 415-425, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.10.018.
- [66] Bueno, P., Tapias, R., López, F. and Díaz, M., Optimizing composting parameters for nitrogen conservation in composting. *Bioresource Technology*, 99(11), pp. 5069-5077, 2008. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.08.087
- [67] Liwarska, E., Bizukojc, M. and Ledakowicz, S., Kinetics of the aerobic biological degradation of shredded municipal solid waste in liquid phase. *Water Research*, 36(8), pp. 2124-2132, 2002. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00418-3.
- [68] Yuan, J., Yang, Q., Zhang, Z., Li, G., Luo, W. and Zhang, D., Use of additive and pretreatment to control odors in municipal kitchen waste during aerobic composting. *Journal of Environmental Sciences*, 37, pp. 83-90, 2015. DOI: 10.1016/j.jes.2015.03.028.
- [69] Barrena, R., Artola, A., Font, X., Gea, T., Pognani, M., Ponsá, S., Colón, J., Ruggieri, L. Y Sánchez, A., La respirometría como herramienta para la clasificación de la biodegradabilidad de residuos orgánicos. Resultados de la experiencia de 10 años. Grupo de investigación en compostaje, Departamento de Ingeniería Química, Universitat Autònoma de Barcelona, España, 2013.
- [70] Cuervo, G.V. and Gómez, C.E., La desertificación en Colombia y el cambio global. *Cuadernos de Geografía*, (12), pp. 121-134, 2003.

J. Soto-Paz, es Ing. Sanitario, estudiante de doctorado en ingeniería, énfasis ingeniería sanitaria y ambiental de la Universidad del Valle. Asimismo, es integrante del grupo de investigación Estudio y control de la contaminación ambiental (ECCA).
ORCID: 0000-0002-9211-6435

E.R. Oviedo-Ocaña, es Ing. Sanitario, MSc. y Dr. en ingeniería por la Universidad del Valle. Es profesor asistente de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander y director del grupo de investigación Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH).
ORCID: 0000-0002-8970-7322

P. Torres-Lozada, es Ing. Sanitaria, MSc. y Dra. en Ing.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 y directora del grupo de investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA).
ORCID: 0000-0001-9323-6677

L.F. Marmolejo-Rebellón, es Ing. sanitario y Dr. 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).
ORCID: 0000-0001-9993-2841

P.C. Manyoma-Valásquez, es Ing. Industrial y Dr. en Ingeniería por la Universidad del Valle. Es profesor asociado en la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad del Valle. Asimismo, es integrante del grupo de investigación Logística y Producción.
ORCID: 0000-0003-1479-5986