

Bio-optimización del compost con cultivos de microorganismos de montaña (MM) y lodos digeridos de biodigestor (LDBIO)

Fabricio Camacho Céspedes¹, Lidieth Uribe Lorío², Quint Newcomer³, Karen Masters⁴ & Maureen Kinyua⁵

1. University of Georgia, Costa Rica Campus, Apartado 108-5655, Monteverde, Costa Rica; fabricio@uga.edu
2. Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas
3. University of Georgia, Odum School of Ecology
4. Council on International Educational Exchange, Sustainability Center Monteverde Costa Rica
5. University of California Davis, Department of Civil and Environmental Engineering

Recibido 04-XII-2017 • Corregido 06-III-2018 • Aceptado 06-IV-2018

ABSTRACT: Bio-optimization of compost with cultures of mountain microorganisms (MM) and digested sludge from bio-digester (LDBIO). Compost is a bio-fertilizer that contains nutrients, organic matter, water and microorganisms that benefit the integrity of agroecosystems. Compost quality is highly dependent on the characteristics of the materials employed in production. One of the main challenges in compost technology is quality optimization. MM are microbial cultures containing dense populations of native soil microorganisms including bacteria, fungi and actinomycetes. LDBIO are the precipitated solids found in anaerobic reactors. This is a low cost, non-experimental, economic, low resolution pre-feasibility study that uses robust laboratory analytical methods to identify whether these compounds can be used as compost optimization agents, and identify the combination of these materials that produce the highest quality compost. According the results obtained, there is empirical evidence that MM and LDBIO have potential as compost optimization agents. The compost with the best quality characteristics (macronutrient concentration, organic matter, carbon and water content, microbial biomass) is the one that contains both MM and LDBIO. The incorporation of these materials in the compost does not affect other compost quality parameters such as pH, EC and C/N ratio. It does not affect the maturity, stability and innocuity of compost. Therefore, at this level of resolution, it is concluded that it is feasible to continue researching these materials as compost optimization agents. It is recommended to implement plant growth-response tests in order to identify the potential of the optimized compost to enhance plant development.

Keywords: Agroecology, circular economy, organic fertilizers, nutrient cycling, organic matter.

RESUMEN: El compost es un abono orgánico que puede aportar nutrientes, materia orgánica, humedad y microorganismos benéficos al agroecosistema. La calidad del compost depende en gran medida de las características de los materiales que se empleen en el proceso de elaboración, por lo que uno de los retos existentes en la tecnología del compostaje es la optimización de la calidad del material terminado. Los MM son inóculos microbianos con altas poblaciones principalmente de hongos, bacterias y actinomicetos que se encuentran naturalmente en el suelo, mientras que los LDBIO son los sólidos precipitados resultantes del proceso de digestión anaeróbica. El empleo de MM y LDBIO como agentes optimizadores de la calidad del compost no ha sido estudiado. El presente trabajo tiene como objetivo investigar, en forma no experimental, económica, y a un nivel de resolución macro utilizando pruebas de laboratorio robustas, si el MM y LDBIO poseen características favorables como agentes efectivos para la optimización del compost, e identificar la combinación de estos materiales que permita producir compost de mayor calidad. De acuerdo con los datos obtenidos, se logra evidenciar a ese nivel de resolución, que efectivamente los MM y LDBIO presentan características apropiadas como agentes optimizadores del compost. El compost que presenta las mejores características de calidad en cuanto a la concentración de macronutrientes, contenido de materia orgánica, carbono, retención de humedad y concentración de biomasa microbiana, es el que contiene MM y LDBIO en forma integrada. La incorporación de estos compuestos no afecta otros parámetros de calidad de este abono, incluyendo el pH, la CE y la relación C/N. Tampoco afecta la capacidad de maduración, la estabilidad y la inocuidad del compost final, por lo que se concluye que es factible continuar invirtiendo en la investigación de estos compuestos como agentes optimizadores del compost. Se recomienda realizar ensayos de respuesta de crecimiento con el abono optimizado para identificar el potencial de aporte al desarrollo de los cultivos.

Palabras Clave: Agroecología, economía circular, abonos orgánicos, reciclaje de nutrientes, materia orgánica.

El compost es un abono orgánico, biológicamente estable, inocuo y con pH neutro que contiene nutrientes y otras sustancias aprovechables para el óptimo crecimiento de los cultivos (Haug, 1993; Beltrán et al., 2002; Golabi, Denney & Iyekar, 2007; Diaz, De Bertoldi & Bidlingmaier, 2011; FAO, 2013b; Lazcano et al., 2014). La incorporación de compost en el suelo es una forma de restaurar y mantener las condiciones de fertilidad natural, al ser un mecanismo efectivo para aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo (Paulin & O'Malley, 2008; FAO, 2013b). El material orgánico mejora la capacidad de retención de humedad del sustrato y ayuda en el almacenaje de nutrientes, así como en el mantenimiento de la biodiversidad microbiana (Bot & Benites, 2005; Lazcano et al., 2014).

El compostaje permite llevar a cabo un manejo estratégico de los residuos biomásicos de los sistemas de producción agrícola, y es una forma efectiva de rescatar y reciclar los nutrientes presentes en dichos residuos (FAO, 2013b), lo cual es un avance importante en el proceso de aumentar la eficiencia en el uso de los recursos disponibles en los sistemas de producción (FAO, 2014). El empleo del compost se alinea con los objetivos de la agricultura regenerativa y climáticamente inteligente, las cuales tienen como finalidad la transformación de los sistemas de producción agropecuaria a modelos con una mayor integridad ambiental y adaptabilidad a la variabilidad climática (FAO, 2013a).

Kotschi (2015) y FAO (2013a) consideran que el compost es un biofertilizante de próxima generación que requiere ser refinado para lograr su consolidación en la agricultura sostenible. La calidad del compost depende en gran medida de las características de los materiales que se emplean en la producción (Campitelli & Ceppi, 2008; Boldrin, Andersen, Møller, Christensen & Favoino, 2009; Bernal et al., 2017), por lo que uno de los retos existentes en la tecnología del compostaje es la optimización de la calidad del material terminado. Uno de los medios para lograr la optimización es a través de la incorporación de materiales alternativos que tengan el potencial de aumentar la concentración de nutrientes, así como el contenido de materia orgánica y la capacidad de retención de humedad en el material terminado.

El empleo de MM y LDBIO como agentes optimizadores de la calidad del compost no ha sido estudiado. El presente estudio tuvo como finalidad identificar la pre-factibilidad de emplear MM y LDBIO en la optimización de compost. El trabajo tiene como objetivo investigar, en forma no experimental, económica, y a un nivel de resolución macro utilizando pruebas de laboratorio robustas, si el MM y LDBIO poseen características

favorables como agentes efectivos para la optimización del compost, e identificar la combinación de estos materiales que permita producir compost de mayor calidad.

METODOLOGÍA

Preparación de abonos: Se prepararon seis diferentes tipos de compost utilizando biomasa vegetal, cultivos de MM y LDBIO provenientes de la Finca Experimental para la Agricultura Sostenible de la Universidad de Georgia, ubicada en San Luis de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica, 10°16'58.38"N - 84°47'52.93"O, elevación 1 100m.s.n.m. Los compost fueron elaborados siguiendo la metodología de FAO (2013b) empleando una mezcla base de 460Kg de biomasa fresca compuesta de 200Kg de residuos de cosecha de hortalizas, legumbres y frutales, 200Kg de hojas de banano y 60Kg de chips de madero negro (*Gliricidia sepium* [Jacq.] Kunth), procurando una relación C:N de 30:1 a 35:1. En el Cuadro 1 se muestra la composición de cada uno de los compost elaborados.

Los MM fueron elaborados siguiendo la metodología de Suchini Ramírez (2012) utilizando hojarasca proveniente del bosque de la Reserva Forestal del Campus de la Universidad de Georgia. Los LDBIO fueron extraídos de uno de los biodigestores tubulares de flujo continuo de la Finca Experimental para la Agricultura Sostenible de la Universidad de Georgia, el cual es alimentado con excretas porcinas y bovinas en suspensión 1:4; estos tuvieron un periodo de acumulación de 5 años en el reactor. Durante el proceso de elaboración del compost se realizó un monitoreo diario de la temperatura (°C), el contenido de agua (m³/m³), y la conductividad eléctrica (dS/m) en cada pila de compost utilizando un multisensor Decagon GS3 Stereo. La saturación de oxígeno (%) dentro de cada montículo fue registrada con un sensor Apogee y el pH con un sensor portátil Kelaway.

Análisis químicos: Se determinó la composición química de una muestra de 500g de cada una de las enmiendas optimizadoras (MM y LDBIO), así como de los compost puros utilizando la metodología de digestión de tejidos descritas en Garfield, Klesta y Hirsh (2000) y Kalra (1998). Estos análisis consistieron en la determinación de las concentraciones de macroelementos (NPK y S) y microelementos (Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn, Zn y B), así como en el cálculo de los valores de humedad, pH, conductividad eléctrica, concentración de carbono y la relación C/N. Los análisis fueron hechos en el Laboratorio de Suelos y Tejidos del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. Todas las muestras tomadas fueron homogenizadas para efectos de estandarizar la

CUADRO 1
Composición de los compost elaborados para evaluar el potencial de los MM y los LDBIO como enmiendas optimizadoras. 2016-2017.

Nombre	Descripción del compost
COPURO	Compost puro: mezcla base más 10Kg de agua al inicio de la elaboración del compost y un promedio de 0,8Kg H ₂ O/día durante la etapa de estabilización.
COMMR	Compost con MM: mezcla base más 10Kg de MMR líquido activado al inicio de la elaboración del compost y un promedio de 0,8Kg MMR/día durante la etapa de estabilización. La R significa que el cultivo de MM lleva todos los compuestos citados en la metodología de elaboración, incluyendo la hojarasca del suelo del bosque.
COMMP	Compost con MM placebo: mezcla base más 10Kg de MMP líquido activado aplicado al inicio de la elaboración del compost y un promedio de 0,8Kg MMP/día durante la etapa de estabilización. La P significa que el cultivo de MM lleva todos los compuestos citados en la metodología de elaboración, excepto la hojarasca recolectada del suelo del bosque, para discriminar que el efecto optimizador esté realmente asociado a la incorporación de los microorganismos en el cultivo.
COLDB	Compost con LDBIO: mezcla base más 40Kg de LDBIO, 10Kg de agua al inicio de la elaboración del compost y un promedio de 0,8Kg H ₂ O/día durante la etapa de estabilización.
COMMR LDBA	Compost con MM y LDBIO A: mezcla base más 40Kg de LDBIO, 10Kg de MMR líquido activado al inicio de la elaboración del compost y un promedio de 0,8Kg MMR /día durante la etapa de estabilización.
COMMR LDBB	Compost con MM y LDBIO B: Compost puro elaborado con 200Kg de residuos de brosa de café, 200Kg de hojas de banano y 60Kg de chips de madero negro, 40Kg de LDBIO, 10Kg de MMR líquido activado al inicio de la elaboración del compost y un promedio de 0,8Kg MMR/día durante la etapa de estabilización.

representatividad de los resultados y los diferentes análisis fueron hechos a las mismas muestras.

Análisis microbiológicos: Se determinó la concentración de bacterias, actinomicetes y hongos de una muestra de 500g de MM y LDBIO utilizando el procedimiento de recuentos de microorganismos viables en placas petri siguiendo la metodología de Wollum (1982), Lorch, Benckieser y & Ottow (1995) y Rodríguez, Gamboa, Hernández y García (2005). También se determinó el contenido de biomasa microbiana (mg C/Kg suelo) de una muestra de 500g de cada uno de los abonos elaborados utilizando el método de extracción-fumigación de Vance, Brookes y Jenkinson (1987). Ambos procedimientos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Microbiología Agrícola del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.

Pruebas de inocuidad, estabilidad y madurez: La inocuidad de los compost fue evaluada a través de la detección de la presencia de *E. coli* (NMP/100 g) de acuerdo a la metodología de Clesceri, Greenberg y Eaton (1998) y US Composting Council (2002). La estabilidad de los compost se determinó utilizando como parámetro la respiración microbiana presente en las muestras según la metodología de Jenkinson & Powlson (1976). La madurez de los abonos fue determinada a través del cálculo del porcentaje de germinación de semillas de pepino (*Cucumis sativus* L.) expuestas en diferentes

proporciones de suelo:abono por un periodo de siete días en condiciones de laboratorio. El ensayo utiliza el pepino como especie indicadora debido a la alta sensibilidad de esta planta a sustancias tóxicas presentes en el sustrato de germinación (Wang & Keturi, 1990). La prueba emplea 15 repeticiones distribuidas en cinco concentraciones de abono y suelo (0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 100:0) para cada muestra de compost. Se considera abono maduro cuando el porcentaje de germinación promedio del grupo es mayor o igual a 80% (BSI, 2011).

RESULTADOS

Proceso de elaboración del compost: Todas las pilas de compost experimentaron las tres etapas teóricas del compostaje durante el proceso de producción: mesófila, termófila y mesófila 2 (Fig. 1). El tiempo aproximado de estabilización fue de 70 días en todas las pilas. A partir de ese periodo, los seis tipos de compost producidos entraron en un lapso de maduración donde las variables monitoreadas mostraron un comportamiento estable (Fig. 2-5). Este periodo tuvo una duración aproximada de 75 días.

Caracterización de las enmiendas optimizadoras: En el Cuadro 2 se resumen las características químicas y microbiológicas de los tres tipos de compuestos que se emplean en el estudio como materiales para la

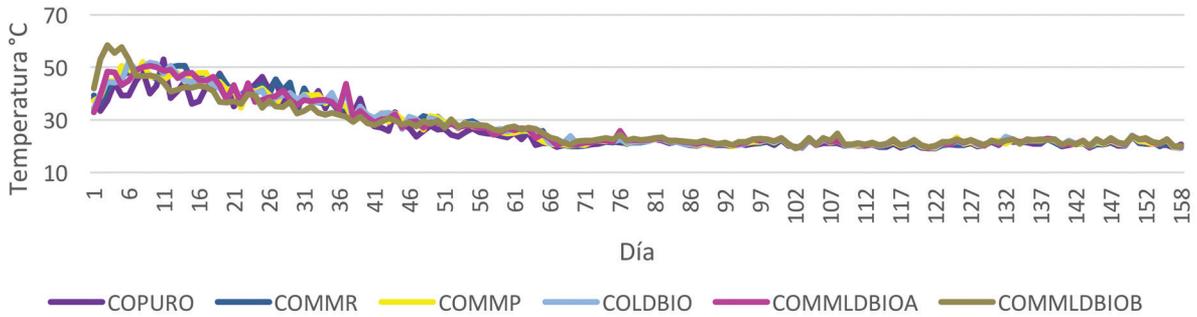


Fig. 1: Variación de la temperatura en grados centígrados (°C) de las pilas de compost. 2016-2017. Los colores de las líneas representan los tipos de compost: morado (compost puro), azul (compost con MM inoculado), amarillo (compost con MM no inoculado), celeste (compost con lodos de biodigestor), magenta (compost con MM y lodos digeridos de biodigestor), café (compost con MM y lodos digeridos de biodigestor con brosa de café en lugar de residuos de cosecha).

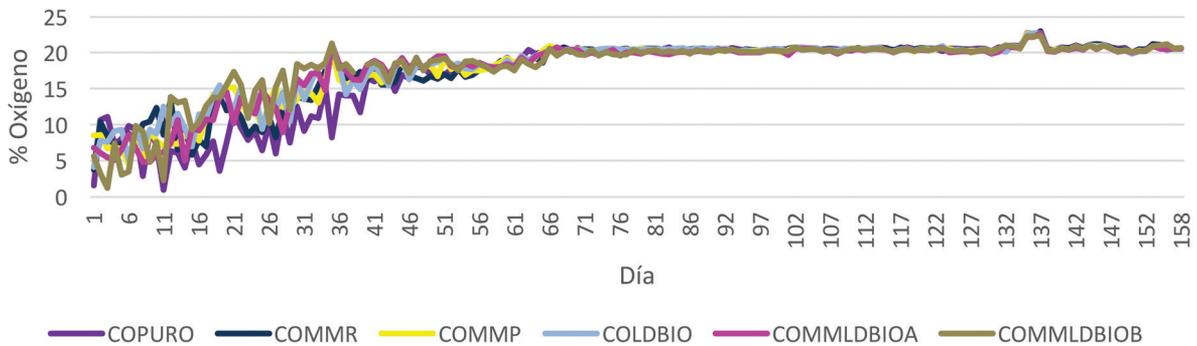


Fig. 2: Variación de la saturación de oxígeno (%) de las pilas de compost. 2016-2017. Ver clave de colores en Fig. 1.

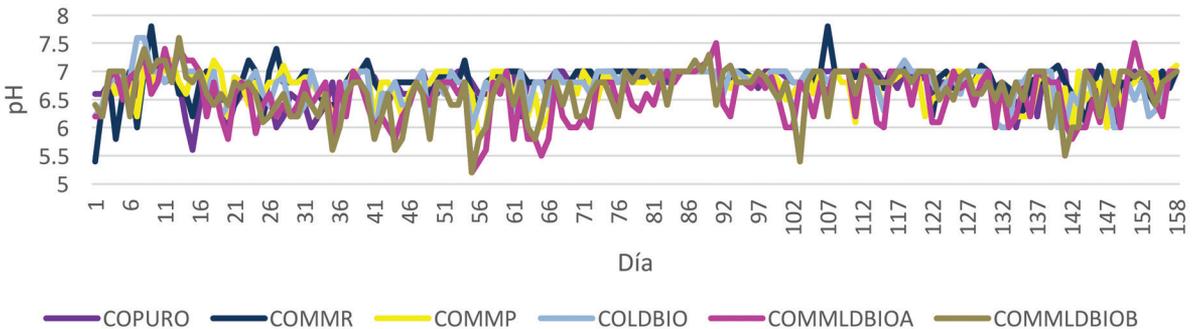


Fig. 3: Variación en el nivel de pH de las pilas de compost. 2016-2017. Ver clave de colores en Fig. 1.

optimización del compost. Los análisis revelan que el aporte de nutrientes por parte de los MM a la mezcla de materiales para el compost es casi nula. Los LDBIO añaden una cantidad considerable de nutrientes al compost. Los MM tienen un pH bajo y al ser abonos líquidos no realizan un aporte de materia orgánica al compost,

mientras que los LDBIO sí tienen la ventaja de añadir una cantidad considerable de materia orgánica y humedad como material fresco. Los tres tipos de materiales hacen un aporte importante de microorganismos. Todos los materiales empleados presentan la ventaja de ser inocuos.

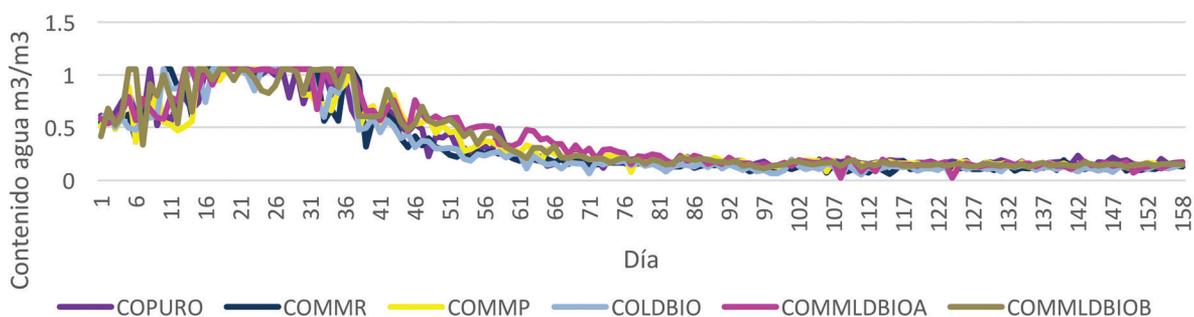


Fig. 4: Variación del contenido de agua de las pilas de compost. 2016-2017. Ver clave de colores en Fig. 1.

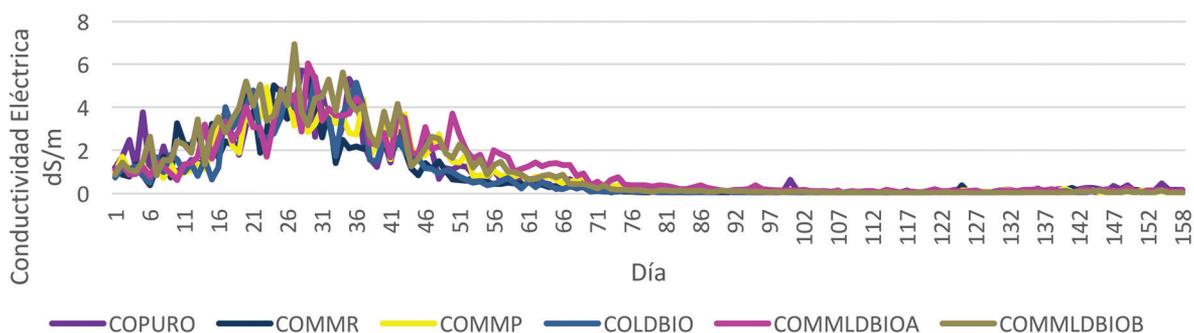


Fig. 5: Variación de la conductividad eléctrica (dS/m) de las pilas de compost. 2016-2017. Ver clave de colores en Fig. 1.

CUADRO 2
Caracterización química y microbiológica de los agentes optimizadores de compost. 2016-2017.

Estado →	LÍQUIDO	LÍQUIDO	SÓLIDO
Análisis	MMR	MMP	LDBIO
N%	0,03	0,05	2,75
P%	0,03	0,05	0,64
K%	0,16	0,019	0,27
Ca%	0,05	0,05	1,57
Mg%	0,09	0,04	0,30
S%	0,05	0,05	0,94
Fe (mg.Kg-1)	17	11	23 144
Cu (mg.Kg-1)	<1	<1	205
Zn (mg.Kg-1)	2	2	1 129
Mn (mg.Kg-1)	3	4	447
B (mg.Kg-1)	1	1	10
pH	3,4	3,4	6,2
Porcentaje de humedad %	NA	NA	90
Conductividad Eléctrica CE (mS/cm)	7,2	8,0	6,6
Carbono C (%)	NA	NA	26,59
Materia Orgánica MO%	NA	NA	38,02
Relación C/N	NA	NA	9,7
Inocuidad (<i>E. coli</i> NMP/100g)	<10	<10	<10
Bacterias UFC/g	2,9X10 ⁶	2,5X10 ⁶	1,9X10 ⁷
Hongos UFC/g	7,1X10 ⁴	1,9X10 ⁵	1,0X10 ⁴
Actinomicetos UFC/g	7,0X10 ⁴	8,0X10 ⁴	3,0X10 ⁴
Densidad g/mL	1,02	1,02	NA

CUADRO 3
Caracterización química y microbiológica de los compost. 2016-2017.

Análisis	COPURO	COMMR	COMMP	COLDBIO	COMMR LDBIOA	COMMR LDBIOB
N%	1,75	1,8	1,71	1,85	1,93	1,62
P%	0,24	0,27	0,3	0,29	0,34	0,26
K%	1,38	1,88	1,68	1,77	1,92	1,65
Ca%	1,58	1,66	1,51	1,69	1,53	1,61
Mg%	0,38	0,41	0,39	0,36	0,38	0,39
S%	0,17	0,19	0,19	0,24	0,27	0,22
Fe (mg.Kg-1)	20 772	19 939	37 327	19 077	16 984	18 968
Cu (mg.Kg-1)	48	47	49	58	57	54
Zn (mg.Kg-1)	125	112	100	153	151	133
Mn (mg.Kg-1)	677	634	702	687	640	709
B (mg.Kg-1)	12	12	11	13	10	15
pH	8,2	8,5	8,5	8,3	8,4	8,5
Porcentaje de humedad %	34	29	37	35	41	30
Conductividad Eléctrica CE (mS/cm)	8,3	10,3	8,9	9,9	10,3	8,3
Carbono C (%)	17,9	18,35	16,8	18,93	19,85	16,33
Materia Orgánica MO%	25,60	26,24	24,02	27,07	28,39	23,35
Relación C/N	10,3	10,3	9,8	10,2	10,3	10,1
Estabilidad (mgCO ₂ g ⁻¹ SV-1 t ⁻¹)	0,288	0,443	0,477	0,421	0,481	0,28
Estabilidad (diagnóstico)	Muy estable	Muy estable				
Madurez %	100	100	93	93	100	100
Madurez (diagnóstico)	Maduro	Maduro	Maduro	Maduro	Maduro	Maduro
Biomasa microbiana (mgC/Kg suelo)	24	55	75	16	30	9
Inocuidad (E. coli NMP/100g)	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Calidad	Optima	Optima	Optima	Optima	Optima	Optima

Caracterización de los compost puros: En el Cuadro 3 se resumen las características de los seis tipos de compost elaborados para conocer preliminarmente el potencial para el mejoramiento de la calidad de este abono que presenta los MM y LDBIO. Los análisis químicos revelaron que a nivel de concentración de macronutrientes (NPK y S), el abono que combina MM y LDBIO (COMMR LDBIOA) es el que presenta las mejores características. No se detectó que haya un aporte importante de micronutrientes, a excepción de Cu y Zn, por parte de los agentes optimizadores en el compost terminado.

El abono que combina MM y LDBIO presentó las mejores características en cuanto al contenido de humedad (H%), al igual que el contenido de materia orgánica (MO%) y carbono (C%). Este mismo abono presenta un rango alto de conductividad eléctrica (CE), lo cual indica la presencia de sales minerales en el compuesto. En este abono, el pH tiende a ser levemente básico, mientras que la relación C/N se mantiene estable.

Todos los abonos elaborados alcanzaron rangos óptimos de estabilidad, madurez e inocuidad. El contenido de biomasa microbiana fue mayor en los abonos que contienen solo MM.

DISCUSIÓN

Agentes optimizadores de compost: La integración de MM y LDBIO en la producción de compost, es una estrategia basada en los principios de la economía circular (Geissdoerfer, Savaget, Bocken & Hultink, 2017), la cual plantea el aprovechamiento eficiente de los residuos y el reciclaje de nutrientes y energía para generar un mayor rendimiento económico y una mejor integridad ambiental en los sistemas productivos. La bio-optimización de compost con MM y LDBIO permite el aprovechamiento de materiales locales, favorece el tiempo de residencia de los nutrientes disponibles en el sistema productivo y otorga un valor agregado a la biodiversidad natural del suelo.

Según Suchini Ramírez (2012) los MM son inóculos microbianos con altas poblaciones principalmente de hongos, bacterias y actinomicetos que se encuentran naturalmente en el suelo. Han sido empleados como inóculo de microorganismos benéficos con el objetivo de optimizar la descomposición de la materia orgánica, fomentando así la liberación de nutrientes disponibles para las plantas (Suchini Ramírez, 2012). Existe evidencia

empírica que demuestra que el empleo de MM como biofertilizante, ha tenido efectos positivos en el desarrollo de varios cultivos incluyendo tomate, acelga y cacao (Acosta Almánzar, 2012; Campo-Martínez, Acosta-Sánchez, Morales-Velasco & Prado, 2014; Medina Flores, Loza, & Agustín, 2014; Castro Barquero, Murillo Roos, Uribe Lorío & Mata Chinchilla, 2015).

Algunos estudios han revelado que la inoculación del compost con microorganismos nativos del suelo ha producido un aumento significativo en la tasa de transformación del material compostable (Kausar, Sariah, Saud, Alam & Ismail, 2010; Amira et al., 2011; Mingyan, Xianlai & Xiaoqi, 2011; Parveen & Padmaja, 2011; Wang, Fan, Hu, & Yin, 2011; Hachicha et al., 2012; Saha et al., 2012). Según Wei et al. (2007) la incorporación sistemática de microorganismos en el proceso de compostaje puede aumentar la tasa de descomposición de la materia orgánica, así como provocar en la reducción del tiempo de maduración y mejoramiento en la calidad final del compost.

Los LDBIO son los sólidos precipitados resultantes del proceso de descontaminación anaeróbica de aguas residuales. Tienen el potencial de incrementar el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de N, P y K en el suelo, por lo que han sido utilizados como sustitutos de fertilizantes sintéticos en la agricultura (Mantovi, Baldoni & Toderi, 2005; Kinyua, Zhang, Camacho-Céspedes, Tejada-Martínez & Ergas, 2016). Los lodos composteados son materiales más estables que los lodos frescos, y presentan la ventaja de que no afectan las características físicas y microbiológicas del suelo (Sciubba et al., 2014; Joo, Monaco, Antmann & Chorath, 2015). Aunque el compostaje de los lodos puede resultar en una disminución del contenido de nutrientes aportados al sustrato final (Mantovi et al., 2005; Sreesai, Peapueng, Tippayamongkonkun & Sthiannopkao, 2013), la utilización del material compostado es más segura desde la perspectiva de inocuidad biológica (Sreesai et al., 2013) y estabilidad química (Mantovi et al., 2005).

Prefactibilidad en el empleo de MM y LDBIO como agentes optimizadores del compost: Según los resultados obtenidos en el presente estudio, el empleo de MM y LDBIO como agentes optimizadores de la calidad del compost es factible porque a nivel individual, estos mostraron características adecuadas como material compostable. Además, se detectó que el LDBIO hace un aporte importante de nutrientes y microorganismos eficientes, mientras que los MM, a pesar de tener un bajo contenido tanto de macro como microelementos, tienen la capacidad de aportar una cantidad importante de microorganismos para potenciar el proceso de descomposición de la materia orgánica presente en el material

compostable. Ambos insumos (MM y LDBIO) presentaron características adecuadas de inocuidad, pH y conductividad eléctrica, lo cual los hace biológicamente seguros y químicamente estables como agentes optimizadores del compost.

En cuanto a la caracterización de los MM que poseen suelo de bosque (MMR) y los que no lo contiene (MMP), no se observan atributos que brinden indicios de que estos compuestos sean diferentes en cuanto a las concentraciones de microorganismos eficientes. Sin embargo, debido a la resolución taxonómica limitada de los análisis empleados, se recomienda para futuros trabajos llevar a cabo pruebas genéticas de mayor resolución, tales como NGS (por sus siglas en inglés Next Generation DNA Sequencing (Goodwin, McPherson & McCombie, 2016)), para detectar si el MMR contiene grupos funcionales de microorganismos que podrían favorecer el proceso de transformación de la materia orgánica de forma más eficiente en sustancias asimilables por los cultivos.

Combinación de agentes optimizadores para el mejoramiento de la calidad del compost: Los análisis de las características de los seis diferentes tipos de compost producidos, revelaron que los compost tratados con los agentes optimizadores en forma integrada (MM + LDBIO) son los que presentan preliminarmente las mejores características en cuanto a la concentración de macronutrientes, contenido de materia orgánica y carbono, retención de humedad y concentración de biomasa microbiana.

Macronutrientes: El compost que contiene ambos agentes optimizadores mostró una mayor concentración de los tres principales macronutrientes (NPK y S). Estos elementos son consumidos en mayores cantidades por las plantas, por lo que son considerados como los principales factores limitantes para el óptimo crecimiento de los cultivos (Hossain, Kamiya, Burritt, Tran & Fujiwara, 2017). En el caso específico del N, la concentración obtenida en el compost tratado con MM y LDBIO fue un 10,28% mayor a la del compost sin tratar y un 28,66% mayor al límite superior del rango normal reportado por FAO (2013b), donde se indica que la concentración de N en el compost puede oscilar entre 0,3% - 1,5%. El valor obtenido de N también fue superior al reportado por Campitelli & Ceppi (2008), quienes indican que el nivel normal para este macronutriente en el compost puede alcanzar valores >0,6%.

En el caso del P, la concentración obtenida en el compost tratado con MM y LDBIO fue 41,66% superior a la del compost sin optimizar. Los valores registrados se encuentran dentro del rango normal reportado por FAO (2013b) (0,1%-1%) y son comparables con los niveles de

P obtenidos por Bernal et al. (2017). El aporte adicional de P en el compost optimizado es importante desde el punto de vista de reciclaje de este nutriente, ya que este es un elemento de disponibilidad limitada en los agroecosistemas (Neset & Cordell, 2012).

Con respecto al K, la concentración alcanzada en el compost tratado con MM y LDBIO fue 39,13% superior a la registrada en el compost que no recibió tratamiento y un 92% mayor al límite superior reportado por FAO (2013b), donde se indica que la concentración de este elemento en el compost convencional puede oscilar entre 0,3% y 1%. En el caso del S, la concentración en el compost optimizado fue 58,82% mayor a la del compost sin optimizar y fue comparable a la reportada por Stoffella & Kahn (2001) para compost tratado con gallinaza, donde el promedio de S alcanzó 0,3%.

La mayor concentración de macronutrientes encontrada en el compost optimizado puede explicarse probablemente por el aporte adicional de nutrientes que realiza los LDBIO (Mantovi et al., 2005; Kinyua et al., 2016), así como por la liberación de nutrientes provenientes de la materia orgánica que realizan los MM durante la etapa de estabilización del compost (Suchini Ramírez, 2012). El aporte adicional de macronutrientes que puede propiciar el uso integrado de MM y LDBIO es importante porque es una forma de aumentar la disponibilidad de estos elementos para los cultivos ya que estos son fundamentales para el mantenimiento de procesos metabólicos que permiten el adecuado funcionamiento de los sistemas vegetativos. Por ejemplo, el N es el mineral más importante que las plantas obtienen del suelo (Lea & Morot-Gaudry, 2001) ya que interviene en todos los procesos de desarrollo al estar asociado a la formación de aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos (Resendez, 2007). El P es el principal elemento en la transferencia y acumulación de energía necesaria para llevar a cabo los procesos de fotosíntesis y respiración, e interviene de forma significativa en la formación de nucleoproteínas, ácidos nucleicos y fosfolípidos (Kass, 1998). El K es un nutriente móvil que participa en procesos de activación enzimática y neutralización de ácidos orgánicos (Blaya & García, 2003). El S es considerado como un macroelemento (Chesworth, 2007) que participa activamente en procesos de regulación osmótica celular, así como en la biosíntesis de lípidos, aminoácidos, clorofila y carotenos (García & García, 2013).

Micronutrientes: El compost tratado con MM y LDBIO mostró una mayor concentración de dos microelementos, Cu (18,75%) y Zn (20,80%), con respecto al compost no tratado. Estos elementos son consumidos en pequeñas cantidades por las plantas (Gissel-Nielsen & Jensen,

2013). Ejecutan funciones vitales que favorecen el óptimo crecimiento de los cultivos ya que participan en una amplia variedad de procesos de oxidación-reducción y activación enzimática en el caso del Cu, y en la formación y funcionamiento de diversos sistemas enzimáticos en el caso del Zn (García & García, 2013). Las concentraciones de Cu y Zn en el compost tratado con MM y LDBIO fueron 44,66% y 31,67 % menores a los promedios obtenidos por Stoffella & Kahn (2001) quienes registraron 103 mg.Kg⁻¹ de Cu y 221 mg.Kg⁻¹ de Zn en compost enriquecido con gallinaza. Otros microelementos, incluyendo el Ca, Mg, Fe, Mn y B, que de igual forma son consumidos en proporciones menores por las plantas (Chatzistathis, 2014), no aumentaron en sus concentraciones con la incorporación de MM y LDBIO, por lo que se deduce que la integración de estos compuestos no mejora el aporte de micronutrientes al compost final.

Un aspecto importante a considerar, es que la mineralización de nutrientes a partir de la descomposición de la materia orgánica por parte de la comunidad microbiana es un proceso gradual que continúa aún después de la incorporación del compost en el suelo (Paulin & O'Malley, 2008; Bernal et al., 2017). Asimismo, puede haber consumo de los nutrientes por parte de los microorganismos (Kaye & Hart, 1997; Lambers, Chapin & Pons, 2008; Barton, 2012), por lo que los valores detectados a la hora de hacer los análisis, solo muestran las concentraciones en un momento determinado, las cuales pueden cambiar en el corto plazo.

Características físicas y microbiológicas: Materia orgánica, carbono, humedad y biomasa microbiana. La cantidad de materia orgánica en el compost tratado con MM y LDBIO fue 10,89% mayor a la concentración alcanzada en el compost tradicional y 41,95% superior al nivel mínimo recomendado por FAO (2013b) para el compost convencional (>20%). La materia orgánica adicional presente en el compost optimizado proviene del aporte que realiza la incorporación de los LDBIO al material compostable (ver Cuadro 3) y puede tener efectos positivos sobre otros parámetros como la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo, el almacenamiento de nutrientes, el aumento de la actividad microbiana y el mejoramiento de la capacidad de retención de humedad (Bot & Benites, 2005).

En el caso específico del C, el nivel obtenido en el compost tratado con MM y LDBIO fue 10,89% mayor al del compost no enmendado y fue equivalente a la concentración de este elemento registrado por Stoffella & Kahn (2001) para compost tratado con gallinaza (19,6%). En relación al contenido de humedad, el compost tratado con MM y LDBIO retuvo un 20,58% más humedad

que el compost no tratado, superó el nivel recomendado por FAO (2013b) (30-40%) y se mantuvo dentro del rango óptimo avalado por US Composting Council (2002) (40-50%). El aumento de ambos parámetros (C% y Humedad%) en el compost tonificado con respecto al compost sin optimizar pudo haber estado relacionado al mayor contenido de materia orgánica presente en el compost que recibió los agentes optimizadores.

La biomasa microbiana tiende a estabilizarse en el compost maduro (Petkova & Kostov, 1996; Tiquia, Tam & Hodgkiss, 1996). En esta etapa la presencia de hongos y bacterias decrece mientras que la abundancia de actinomicetes aumenta (Antil & Raj, 2012) en respuesta a su capacidad de continuar con la descomposición de sustancias con estructura molecular complejas como la lignina (Kirby, 2005; Brown & Chang, 2014). La biomasa microbiana del compost tratado con MM y LDBIO fue 25% superior a la del compost genérico. Las mayores concentraciones de esta biomasa, fueron encontradas en el compost tratado solamente con MM (Vance et al., 1987).

Otros parámetros de calidad del compost: Relación C/N. El aumento en las concentraciones de C y N en el compost tratado con MM y LDBIO no generó un desbalance en la relación C:N del sustrato debido a que las cantidades en las que ambos elementos aumentaron en el compost optimizado fueron equivalentes entre sí, ocasionando que no hubiera diferenciación en dicha relación entre el compost optimizado y el compost no tratado. La puntuación obtenida para ambos compost se mantuvo dentro del rango óptimo recomendado por FAO (2013b) (10:1 15:1) y fue inferior al (15,9) registrado por Bernal et al. (2017).

pH: El pH ácido del MM aplicado al inicio del proceso de compostaje y durante el periodo de maduración del compost no afectó los niveles de pH en ninguno de los compost elaborados. El proceso de compostaje estabilizó el pH del compost terminado en todos los casos. Este parámetro se mantuvo dentro del rango óptimo recomendado por FAO (2013b) (6,5-8,5), levemente por encima del óptimo recomendado por US Composting Council (2002) y Maheshwari (2014) (6-8), y fue comparable con los resultados de Bernal et al. (2017) y Stoffella & Kahn (2001) (~8). La neutralización del pH es uno de los principales beneficios del compostaje (Haug, 1993), ya que el compost con pH cercano a neutro puede ser aplicado a una amplia variedad de cultivos sin causar problemas de acidificación del suelo.

CE: La conductividad eléctrica es un parámetro importante en la calidad del compost como indicador de la concentración de sales en el sustrato (Maheshwari, 2014), ya que el exceso de sales minerales como el Na puede

causar inhibición en el crecimiento de las plantas (Bernal et al., 2017), lo cual puede ocasionar problemas de germinación y de desarrollo radicular (Stoffella & Kahn, 2001). Todos los compost mantuvieron la CE dentro del rango óptimo reportado por US Composting Council (2002) en 10 mS/cm, lo cual indica que la presencia de sales en los compost se encuentra dentro de los límites aceptables. Este parámetro no fue afectado con la incorporación de MM y LDBIO en el material compostable.

Inocuidad: La inocuidad del compost no se vio afectada por la incorporación de MM y LDBIO, medida a través de la concentración de *E. coli*, en ninguno de los compost elaborados. La presencia de *E. coli* para el compost enmendado con MM y LDBIO fue negativa al igual que en el compost sin optimizar, lo cual se explica por el efecto de higienización que ocurre durante el proceso de compostaje con el aumento de la temperatura a nivel termófilico (Hess, Grdzlishvili, Sheng & Hovde, 2004). Otro factor que aporta positivamente en la inocuidad del compost optimizado, es el hecho que el MM y los LDBIO son también materiales inocuos (Cuadro 2).

Estabilidad: La tasa de respiración (mg CO₂ g⁻¹ Sólidos Volátiles-1 tiempo-1) es un indicador de la cantidad de materia orgánica presente en el compost y se encuentra inversamente relacionada al nivel de estabilidad alcanzado en el material biodegradado (Zucconi & de Bertoldi, 1987). A menor respiración, mayor estabilidad debido a que la actividad microbiana baja considerablemente durante el proceso de maduración y estabilización del compost. Según BSI (2011), la tasa de respiración para un compost estable y maduro debe ser <6 mg CO₂ g⁻¹ Sólidos Volátiles-1 día⁻¹ después de 20 semanas de compostaje. El valor alcanzado sobre este parámetro para todos los compost elaborados estuvo por debajo del nivel mínimo, no se muestran indicios de que la estabilidad se vea afectada por la incorporación de MM y LDBIO.

Madurez: La madurez es el grado de fitotoxicidad presente en el compost (Diaz et al., 2011). La fitotoxicidad es la presencia de sustancias o condiciones que pueden inhibir el crecimiento de las plantas (Cohen et al., 2009). El ensayo de germinación es la prueba más sensible para determinar el nivel de madurez del abono (Helfrich et al., 1998) debido a que la presencia de sustancias tóxicas o condiciones que pueden afectar la germinación de las plantas (p.ej. desbalance en pH, relación C:N, CE), es una característica del compost inmaduro que impide que las plantas germinen (Forte, Pera, De Bertoldi & Zucconi, 1981). Se considera abono maduro cuando el porcentaje de germinación es mayor o igual a 80% (BSI, 2011). Los resultados obtenidos revelan que, de acuerdo

al criterio de madurez por germinación, todos los abonos producidos para este estudio presentan un nivel óptimo de madurez después de 21 semanas de compostaje. No se muestran indicios de que la incorporación de MM y LDBIO afecten la capacidad de maduración del compost.

La metodología de elaboración del compost, así como las técnicas de muestreo y análisis utilizadas para la caracterización de las muestras son lo suficientemente confiables y robustas para revelar a un nivel de resolución macro, las características de los diferentes abonos. En este sentido, de acuerdo a los datos obtenidos, se logra evidenciar a ese nivel de resolución, que efectivamente los MM y LDBIO presentan características favorables como agentes optimizadores del compost. El compost que presenta las mejores características de calidad en cuanto a la concentración de macronutrientes, contenido de materia orgánica, carbono, retención de humedad y concentración de biomasa microbiana es el que contiene ambos compuestos, MM y LDBIO. La incorporación de estos compuestos no afecta los parámetros de calidad de éste abono incluyendo el pH, la conductividad eléctrica y la relación C/N. Tampoco afecta la capacidad de maduración, la estabilidad y la inocuidad del compost final, por lo que se concluye que es factible continuar invirtiendo en la investigación de estos compuestos como agentes optimizadores del compost. Para tales efectos se recomienda llevar a cabo ensayos de respuesta de crecimiento con el abono optimizado para identificar el potencial de aporte para el desarrollo de los cultivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a University of Georgia Costa Rica Campus y al Consejo Nacional para Investigaciones Tecnológicas de Costa Rica por el apoyo logístico y económico brindado para la elaboración del presente estudio.

REFERENCIAS

- Acosta Almánzar, H. A. (2012). *Microorganismos eficientes de montaña: evaluación de su potencial bajo manejo agroecológico de tomate en Costa Rica*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Amira, R. D., Roshanida, A., Rosli, M., Zahrah, M. S. F., Anuar, J. M., & Adha, C. N. (2011). Bioconversion of empty fruit bunches (EFB) and palm oil mill effluent (POME) into compost using *Trichoderma virens*. *African Journal of Biotechnology*, 10(81), 18775-18780.
- Antil, R. S., & Raj, D. (2012). Chemical and microbiological parameters for the characterization of maturity of composts made from farm and agro-industrial wastes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(8), 833-845. doi:10.1080/03650340.2011.554402
- Barton, L. (2012). *Iron Chelation in Plants and Soil Microorganisms*. ornia, EEUU: Academic Press.
- Beltrán, E., Miralles de Imperial, R., Porcel, M., Delgado, M., Beringola, M., Martín, J., & Bigeriego, M. (2002). *Effect of sewage sludge compost application on ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen contents of an olive grove soil*. Paper presented at the 12th ISCO Conference, Beijing.
- Bernal, M. P., Sommer, S. G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., & Michel Jr, F. C. (2017). Current Approaches and Future Trends in Compost Quality Criteria for Agronomic, Environmental, and Human Health Benefits. oogle.coQ*Advances in agronomy*, 144, 143-233. doi:10.1016/bs.agron.2017.03.002
- Blaya, S. N., & García, G. N. (2003). *uímica agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Boldrin, A., Andersen, J. K., Møller, J., Christensen, T. H., & Favoino, E. (2009). Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, 27(8), 800-812. doi:10.1177/0734242X09345275
- Bot, A., & Benites, J. (2005). *The Importance of Soil Organic Matter: Key to Drought-resistant Soil and Sustained Food Production*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Brown, M. E., & Chang, M. C. (2014). Exploring bacterial lignin degradation. *Current opinion in chemical biology*, 19, 1-7. doi:10.1016/j.cbpa.2013.11.015
- BSI. (2011). *PAS 100:2011. Specification for Composted Materials*. London, UK.: British Standards Institution.
- Campitelli, P., & Ceppi, S. (2008). Chemical, physical and biological compost and vermicompost characterization: A chemometric study. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 90(1), 64-71. doi:10.1016/j.chemolab.2007.08.001
- Campo-Martínez, A., Acosta-Sanchez, R. L., Morales-Velasco, S., & Prado, F. A. (2014). Evaluación de microorganismos de montaña (mm) en la producción de acelga en la meseta de Popayán. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(1), 79-87.
- Castro Barquero, L., Murillo Roos, M., Uribe Lorío, L., & Mata Chinchilla, R. (2015). Inoculación al suelo con *Pseudomonas fluorescens*, *Azospirillum oryzae*, *Bacillus subtilis* y microorganismos de montaña (mm) y su efecto sobre un sistema de rotación soya-tomate bajo condiciones de invernadero. *Agronomía Costarricense*, 39(3), 21-36.
- Chatzistathis, T. (2014). *cMicronutrient Deficiency in Soils and Plants*. Sharjah, Emiratos Árabes Unidos: Bentham Science Publishers. doi:10.2174/97816080593481140101

- Chesworth, W. (2007). *Encyclopedia of Soil Science*. Netherlands: Springer.
- Clesceri, L. S., Greenberg, A. E., & Eaton, A. D. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th Edition. Washington, DC, EEUU: APHA American Public Health Association
- Diaz, L. F., De Bertoldi, M., & Bidlingmaier, W. (2011). *Compost science and technology* (Vol. 8). Netherlands: Elsevier.
- FAO. (2013a). *Climate Smart Agriculture Sourcebook*. Rome: FAO.
- FAO. (2013b). *Manual de Compostaje del Agricultor*. Santiago de Chile: FAO.
- FAO. (2014). *Building a common vision for sustainable food and agriculture: Principles and approaches*. Rome: FAO.
- Forte, M., Pera, A., De Bertoldi, M., & Zucconi, F. (1981). Evaluating Toxicity of Immature Compost. *BioCycle*, 22(2), 54.
- García, G. N., & García, S. N. (2013). *Química Agrícola Química del Suelo y de Nutrientes Esenciales para las Plantas*. Madrid, España: Mundi-Prensa Libros.
- Garfield, F. M., Klesta, E., & Hirsh, J. (2000). *Quality Assurance Principles for Analytical Laboratories* (Vol. Third Edition). Gaithersburg, MD, USA: AOAC International.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143(Supplement C), 757-768.
- Gissel-Nielsen, G., & Jensen, A. (2013). *Plant Nutrition — Molecular Biology and Genetics: Proceedings of the Sixth International Symposium on Genetics and Molecular Biology of Plant Nutrition*: Springer Netherlands.
- Golabi, M. H., Denney, M., & Iyengar, C. (2007). Value of composted organic wastes as an alternative to synthetic fertilizers for soil quality improvement and increased yield. *Compost science & utilization*, 15(4), 267-271. doi:10.1080/1065657X.2007.10702343
- Goodwin, S., McPherson, J. D., & McCombie, W. R. (2016). Coming of age: ten years of next-generation sequencing technologies. *Nature Reviews Genetics*, 17(6), 333. doi:10.1038/nrg.2016.49
- Hachicha, R., Rekik, O., Hachicha, S., Ferchichi, M., Woodward, S., Moncef, N., . . . Mechichi, T. (2012). Co-composting of spent coffee ground with olive mill wastewater sludge and poultry manure and effect of *Trametes versicolor* inoculation on the compost maturity. *Chemosphere*, 88(6), 677-682. doi:10.1016/j.chemosphere.2012.03.053
- Haug, R. T. (1993). *The practical handbook of compost engineering*. EEUU: CRC Press.
- Helfrich, P., Chefetz, B., Hadar, Y., Chen, Y., & Schnabl, H. (1998). A novel method for determining phytotoxicity in composts. *Compost science & utilization*, 6(3), 6-13. doi:10.1080/1065657X.1998.10701926
- Hess, T. F., Grdzlishvili, I., Sheng, H., & Hovde, C. J. (2004). Heat inactivation of *E. coli* during manure composting. *Compost science & utilization*, 12(4), 314-322. doi:10.1080/1065657X.2004.10702200
- Hossain, M. A., Kamiya, T., Burritt, D. J., Tran, L. S. P., & Fujiwara, T. (2017). *Plant Macronutrient Use Efficiency: Molecular and Genomic Perspectives in Crop Plants*. Netherlands: Elsevier Science.
- Jenkinson, D., & Powlson, D. S. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: a method for measuring soil biomass. *Soil biology and Biochemistry*, 8(3), 209-213. doi:10.1016/0038-0717(76)90005-5
- Joo, S. H., Monaco, F. D., Antmann, E., & Chorath, P. (2015). Sustainable approaches for minimizing biosolids production and maximizing reuse options in sludge management. A review. *Journal of environmental management*, 158, 133-145. doi:10.1016/j.jenvman.2015.05.014
- Kalra, Y. P. (1998). *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. Boston, EEUU: CRC Press.
- Kass, D. C. L. (1998). *Fertilidad de Suelos*. San José, Costa Rica: EUNED
- Kausar, H., Sariah, M., Saud, H. M., Alam, M. Z., & Ismail, M. R. (2010). Development of compatible lignocellulolytic fungal consortium for rapid composting of rice straw. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64(7), 594-600. doi:10.1016/j.ibiod.2010.06.012
- Kaye, J. P., & Hart, S. C. (1997). Competition for nitrogen between plants and soil microorganisms. *Trends in Ecology & Evolution*, 12(4), 139-143. doi:10.1016/S0169-5347(97)01001-X
- Kinyua, M. N., Zhang, J., Camacho-Céspedes, F., Tejada-Martínez, A., & Ergas, S. J. (2016). Use of physical and biological process models to understand the performance of tubular anaerobic digesters. *Biochemical Engineering Journal*, 107, 35-44. doi:10.1016/j.bej.2015.11.017
- Kirby, R. (2005). Actinomycetes and lignin degradation. *Advances in applied microbiology*, 58, 125-168. doi:10.1016/S0065-2164(05)58004-3
- Kotschi, J. (2015). *A Soiled reputation. Adverse impacts of mineral fertilizers in tropical agriculture*. Germany: WWF Germany-Heinrich Böll Stiftung.
- Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology*. New York: Springer New York.
- Lazcano, C., Martínez-Blanco, J., Christensen, T. H., Muñoz, P., Rieradevall, J., Møller, J., . . . & Nuñez, M. (2014). *Environmental benefits of compost use on land through LCA—a review of the current gaps*. Paper presented at the Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector (LCA Food 2014), San Francisco, California, USA, 8-10 October, 2014.
- Lea, P. J., & Morot-Gaudry, J. F. (2001). *Plant Nitrogen*. Berlin: Springer.

- Lorch, H., Benckieser, G., & Ottow, J. (1995). Basic methods for counting microorganisms in soil and water. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*, 1995, 146-161.
- Maheshwari, D. K. (2014). *Composting for sustainable agriculture* (Vol. 3): Springer. doi:10.1007/978-3-319-08004-8
- Mantovi, P., Baldoni, G., & Toderi, G. (2005). Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land: effects of long-term application on soil and crop. *Water research*, 39(2), 289-296. doi:10.1016/j.watres.2004.10.003
- Medina Flores, C. M., Loza, T., & Augustín, J. (2014). *Efecto de dosis y aplicaciones edáficas y foliar de microorganismos de montaña con y sin sales minerales en el rendimiento del cacao (Theobroma cacao L.) variedad criolla*. Municipio San José de Bocay, Jinotega, febrero-mayo del 2014. (Ing. en Agroecología Tropical), Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León Nicaragua.
- Mingyan, Y., Xianlai, Z., & Xiaoqi, Z. (2011). Screening of complex thermophilic microbial community and application during municipal solid waste aerobic composting. *African Journal of Biotechnology*, 10(67), 15163-15169. doi:10.5897/AJB10.2559
- Neset, T. S. S., & Cordell, D. (2012). Global phosphorus scarcity: identifying synergies for a sustainable future. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(1), 2-6. doi:10.1002/jsfa.4650
- Parveen, A. A., & Padmaja, C. (2011). Efficacy of fungi and actinomycetes in converting municipal solid waste (MSW) and water hyacinth (WH) into organic manure. *Research on crops*, 12(1), 167-172.
- Paulin, B., & O'Malley, P. (2008). *Compost production and use in horticulture*. Western Australia: Western Australia Agriculture Authority.
- Petkova, G., & Kostov, O. (1996). Microbiological processes under vine-twig composting. *Pochvoznanie, Agrokhimiia y Ekologiya*, 31(5), 25-28.
- Resendez, A. M. (2007). *Elementos Nutritivos. Asimiliación, Funciones, Toxicidad E Disponibilidad En Los Suelos*. Editorial Libros en Red.
- Rodríguez, E., Gamboa, M., Hernández, F., & García, J. (2005). *Bacteriología General: Manual de laboratorio*. Universidad de Costa Rica. Facultad de Microbiología.
- Saha, N., Mukherjee, D., Sen, S., Sarkar, A., Bhattacharaya, K., Mukhopadhyay, N., & Patra, P. (2012). Application of highly efficient lignocellulolytic fungi in cocomposting of paddy straw amended poultry droppings for the production of humus rich compost. *Compost science & utilization*, 20(4), 239-244. doi:10.1080/1065657X.2012.10737054
- Sciubba, L., Cavani, L., Negroni, A., Zanaroli, G., Fava, F., Ciavatta, C., & Marzadori, C. (2014). Changes in the functional properties of a sandy loam soil amended with biosolids at different application rates. *Geoderma*, 221, 40-49. doi:10.1016/j.geoderma.2014.01.018
- Sreesai, S., Peapueng, P., Tippayamongkonkun, T., & Sthiannopkao, S. (2013). Assessment of a potential agricultural application of Bangkok-digested sewage sludge and finished compost products. *Waste Management & Research*, 31(9), 925-936.
- Stoffella, P. J., & Kahn, B. A. (2001). *Compost utilization in horticultural cropping systems*. CRC press. doi:10.1201/9781420026221
- Suchini Ramírez, J. G. (2012). *Innovaciones agroecológicas para una producción agropecuaria sostenible en la región del Trifinio*. Turrialba (Costa Rica): CATIE.
- Tiquia, S., Tam, N., & Hodgkiss, I. (1996). Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. *Environmental Pollution*, 93(3), 249-256. doi:10.1016/S0269-7491(96)00052-8
- US Composting Council. (2002). *Test methods for the examination of composting and compost*. Reston, Vermont, USA: US Composting Council.
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil biology and Biochemistry*, 19(6), 703-707. doi:10.1016/0038-0717(87)90052-6
- Wang, & Keturi, P. H. (1990). Comparative seed germination tests using ten plant species for toxicity assessment of a metal engraving effluent sample. *Water, Air, and Soil Pollution*, 52(3-4), 369-376. doi:10.1016/j.biortech.2011.07.044
- Wang, H.-y., Fan, B.-q., Hu, Q.-x., & Yin, Z.-w. (2011). Effect of inoculation with *Penicillium expansum* on the microbial community and maturity of compost. *Bioresource technology*, 102(24), 11189-11193. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.12.067
- Wei, Z., Xi, B., Zhao, Y., Wang, S., Liu, H., & Jiang, Y. (2007). Effect of inoculating microbes in municipal solid waste composting on characteristics of humic acid. *Chemosphere*, 68(2), 368-374.
- Wollum, A. (1982). Cultural methods for soil microorganisms. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, 2, 781-802.
- Zucconi, F., & de Bertoldi, M. (1987). Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. In *Compost: production, quality and use* (pp. 30-50). Netherlands: Elsevier.