

PRODUCCIÓN DE COMPOST MEDIANTE LA DEGRADACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS CON MICROORGANISMOS EFECTIVOS EN HUÁNUCO

Production of compost by degradation organic solid waste with effective microorganisms in Huánuco

Luis Cristhian Vidal Romero¹, Jairo Edson Gutiérrez-Collao², Charles Frank Saldaña-Chafloque³, Evelyn Ruth Palomino-Santos⁴, Camila Valentina Carrasco Llaique⁵, Natalia Menquely Torres Zurita⁶

RESUMEN

Castillo Grande, ubicado en Huánuco - Perú, presenta el problema de contaminación producido por el incremento de los residuos sólidos, en especial de los orgánicos, que no son aprovechados, por lo que se propone la forma de degradación de dichos residuos, planteando el objetivo, de evaluar la acción de microorganismos efectivos provenientes de distintas fuentes en la degradación de los residuos sólidos orgánicos, y su influencia en la producción de compost con mejores parámetros químicos. La metodología empleada fue un diseño experimental completamente al azar, con tres tratamientos (Compost₁, Compost₂ y Compost₃) y tres repeticiones por tratamiento, donde los análisis de las variables, tales como periodo de degradación de residuos sólidos orgánicos y parámetros químicos del compost, estuvieron en función de los valores promedios y de dispersión. Los resultados no reportan diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en el periodo de degradación; pero sí en ciertos parámetros químicos. El Compost₁ es el que reportó menor periodo de degradación y mayores contenidos de materia orgánica en estado seco, humedad, nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, sodio, zinc y manganeso, cumpliendo en gran parte los niveles establecidos por la Norma Técnica Peruana 201.208:2021; mientras que los mayores contenidos de Ca y Fe se registró con el Compost₃. Concluyendo que los microorganismos efectivos provenientes de la hojarasca, son los adecuados para descomponer residuos sólidos orgánicos y producir compost en menor tiempo y con buenos parámetros químicos.

Palabras clave: residuos sólidos, degradación, microorganismos efectivos, compost.

ABSTRACT

Castillo Grande, located in Huánuco - Peru, presents the problem of contamination produced by the increase of solid waste, especially organic waste, which is not used, so the way of degradation of such waste is proposed, proposing the objective of evaluating the action of three types of effective microorganisms in the degradation of organic solid waste and in the production of compost with parameters chemical. The methodology used was a completely randomized experimental design, with three treatments (Compost₁, Compost₂ and Compost₃) and three repetitions per treatment, where the analysis of variables, such as the degradation period of organic solid waste and chemical parameters of the compost, were a function of the average values and dispersion. The results do not report statistically significant differences between treatments in the degradation period; but it does in certain chemical parameters. Compost₁ is the one that reported the shortest degradation period, and higher organic matter contents in the dry state, moisture, nitrogen, phosphorus, potassium, magnesium, sodium, zinc and manganese, largely complying with the levels established by the Peruvian Technical Standard 201.208:2021; while the highest Ca and Fe content was recorded with Compost₃. Concluding that the effective microorganisms from the leaf litter are suitable for decomposing organic solid waste and producing compost in less time and with good chemical parameters.

Keywords: solid waste, degradation, effective microorganisms, compost.

¹ Independiente, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1128-7646>. luischristian27@gmail.com

² ✉ Docente investigador, Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8984-6245>. jairo.gutierrez@unat.edu.pe

³ Docente investigador, Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9537-2680>. charlessaldana@unat.edu.pe

⁴ Docente investigador, Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5991-2899>. evelyn.palomino@unat.edu.pe

⁵ Docente investigador, Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1244-6858>. camilacarrasco@unat.edu.pe

⁶ Consultora, Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9810-1396>. e_2018102006E@uncp.edu.pe

INTRODUCCIÓN

El incremento de los residuos sólidos eliminados en el ambiente, sin tratamiento y recuperación de recursos es considerado un riesgo a la salud humana y al ambiente (Ali et al., 2023); por lo cual, es imprescindible efectuar una sostenible gestión de dichos residuos, en especial de los residuos sólidos producidos en las zonas urbanas, lo que permitirá alcanzar ciertos objetivos del desarrollo sostenible (Khuntia et al., 2022). Sin embargo, la incineración, los vertederos y el compostaje en hileras, son prácticas de gestión de residuos sólidos urbanos que han mostrado debilidad en el reciclaje (Wang et al., 2024); quizás, producto del incremento de la cantidad de los residuos sólidos urbanos en los últimos años (Saluja et al., 2024). De dichos residuos sólidos urbanos, la parte orgánica presenta una digestión anaeróbica proclive a perjuicio del sistema en situaciones de tasas altas de carga orgánica, que disminuye la eficiencia del proceso de degradación y ocasiona a pérdidas económicas (Chen et al., 2024); debido a que el reciclaje de la parte orgánica es esencial para lograr la sostenibilidad y economía circular, motivo por el cual, se emplea el compostaje, como una práctica de gestión para el reciclaje de residuos sólidos urbanos (Andraskar et al., 2023).

Ante los elevados precios de los fertilizantes químicos, es importante producir compost rico en nutrientes que sirva como una opción de fertilizante orgánico (Sultana et al., 2023). Por ello, es necesario realizar el compostaje; aunque existe dificultad, debido a que solo utiliza entre el 10 y 12 % de los residuos sólidos urbanos, a causa de la falta de segregación de dichos residuos; y también por los periodos largos que implica el proceso, por los olores, emisiones de gases de efecto invernadero, pérdida de nitrógeno y la baja calidad del compost (Andraskar et al., 2023). La falta de segregación de los residuos sólidos urbanos lo convierte en una preocupación importante en el mundo con efectos adversos para el ambiente, salud y la economía (Radhakrishnan et al., 2024).

Para el éxito del proceso de compostaje, las colonias de microorganismos desempeñan una función clave es las distintas etapas, desde las bacterias y hongos mesófilos hasta bacterias que descomponen la celulosa y las que descomponen la lignina (Luo et al., 2023). Los microorganismos efectivos son una alternativa viable para la nutrición de los cultivos agrícolas que se producen orgánicamente (Peralta-Antonio et al., 2019); y están representados por un

aproximado de 80 variedades de microorganismos, y está conformado principalmente por bacterias fotosintéticas, bacterias ácido lácticas y levaduras, cuya mezcla no son tóxicos, ni perjudiciales, sino que son benéficos y altamente efectivos (Callisaya y Fernández, 2017); también está compuesto por actinomicetos y hongos fermentadores (Soriano, 2016). Además, se caracterizan por acelerar los procesos de degradación de compuestos orgánicos que forman parte de los residuos sólidos (Melendrez y Sánchez, 2019); esto a partir del crecimiento microbiano que tiene influencia directa en los factores de contenido de humedad, temperatura, pH, aireación, relación carbono/nitrógeno, cantidad de nutrimentos, porosidad del compost que determinan la eficiencia y la velocidad de la degradación de la parte orgánica (Ramos-López, 2019).

El compost, como abono orgánico, es empleado para mejorar las propiedades físicas, química y microbiológicas del suelo, sin contaminar el ambiente (Miyashiro, 2014); siempre y cuando, el compost sea maduro y de calidad, porque de lo contrario, podría ocasionar efectos adversos en plantas y al entorno del suelo (Fan et al., 2018). La empleabilidad de materia orgánica en los suelos agrícolas, es una herramienta en la generación de alimentos en el mundo, al no contaminar el ambiente (Matías-Ramos et al., 2023; Nuñez et al., 2023).

El distrito de Castillo Grande, ubicado en la provincia de Leoncio Prado, de la región Huánuco - Perú, enfrenta el reto de la gestión de los residuos sólidos urbanos; tal como sucede en los municipios de los países en vías de desarrollo a nivel mundial (Jabeen et al., 2023). Además, si el estudio se replica por los pobladores de Castillo Grande, sería una oportunidad de negocios y un ingreso económico para su bienestar.

En tal sentido, los residuos sólidos orgánicos, serían aprovechados elaborando un abono orgánico denominado compost, generando impactos positivos para los habitantes de Castillo Grande; asimismo, se reduciría el empleo de fertilizantes químicos, reduciendo la huella de gases de efecto invernadero, optimizando los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de los suelos, provocando un efecto positivo para el ambiente. La investigación tiene como objetivo, evaluar la acción de microorganismos efectivos provenientes de distintas fuentes en la degradación de los residuos sólidos orgánicos, y su influencia en la producción de compost con mejores parámetros químicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio

La investigación se realizó en el distrito Castillo Grande (Leoncio Prado, Huánuco, Perú), en un área experimental de 1 250 m² (25 m x 50 m), ubicado en las coordenadas UTM, 38741 m al este y 8974239 m al norte, con una altitud 656 m s.n.m. El distrito Castillo Grande reporta una temperatura media mensual de 24 °C, una precipitación promedio anual de 3 250 mm y 80 % de humedad relativa anual (Casimiro, 2022).

Metodología

Muestreo

En los hogares y restaurantes del distrito Castillo Grande, se recolectaron 35 019.80 kg de residuos sólidos durante nueve días, con frecuencia interdiaria, de los cuales, al segregar los residuos, se obtuvieron 33 570.80 kg de residuos sólidos orgánicos, que sirvieron para realizar la mezcla con los microorganismos efectivos procedentes de la colecta de hojarasca, madera degradada y raíces. Los microorganismos efectivos registrados inicialmente fueron microorganismos aerobios viales (bacterias termófilas y hongos) y los actinomicetos, en las siguientes cantidades: hojarasca ($1\ 249.6 \times 10^3$ UFC g⁻¹ de microorganismos aerobios viales y 14.7×10^3 UFC g⁻¹ de actinomicetos), madera degradada ($1\ 231.4 \times 10^3$ UFC g⁻¹ de microorganismos aerobios viales y 43.7×10^3 UFC g⁻¹ de actinomicetos) y raíces (768.4×10^3 UFC g⁻¹ de microorganismos aerobios viales y 1.8×10^3 UFC g⁻¹ de actinomicetos).

Diseño experimental

El diseño experimental fue completamente al azar, con tres tratamientos (Compost₁, Compost₂ y Compost₃) y tres repeticiones por tratamiento (nueve unidades experimentales en total). Las repeticiones se conformaron por una cama de compostaje.

Preparación de Compost

Los composts se prepararon en camas de compostaje de madera, colocadas en el piso, cuyas dimensiones fueron 0.18 m x 2.68 m x 3.77 m. La preparación se realizó de acuerdo al proceso de producción de la Municipalidad del distrito Castillo Grande, agregando aserrín en las bases de las camas de compostaje. Se

utilizó la melaza de caña de azúcar por ser un acelerador de la descomposición de la materia orgánica (Sanclemente et al., 2011); y el polvillo de arroz por su capacidad de optimización del crecimiento bacteriano (De los Ángeles et al., 2005).

Al inicio, se realizó la preparación sólida, mezclando y homogeneizando 10 kg de hojarasca, 10 kg de madera degradada o 10 kg de raíces con 5 L de melaza de caña de azúcar y 5 kg de polvillo de arroz, obteniéndose mezclas para anaeróbicos y para aeróbicos.

Las mezclas anaeróbicas se colocaron en tres recipientes de 20 L codificados correctamente (hojarasca, madera degradada o raíces), siendo compactados y cerrados para impedir la entrada de aire, durante 30 días; mientras que, las mezclas aeróbicas se colocaron en tres costales de tela codificados correctamente (hojarasca, madera degradada o raíces), que se removieron constantemente, por un lapso de 13 días.

Posteriormente, se realizó la preparación líquida en tres barriles de polietileno codificados correctamente (hojarasca, madera degradada o raíces), agregando 5 L de melaza, 120 L de agua, 5 kg de mezcla anaeróbicas, 1 kg de mezclas aeróbicas y 960 g de leche en polvo. Las mezclas en cada barril se removieron hasta obtener una uniformidad, y se taparon adecuadamente, dejándolos reposar durante siete días.

Obtención y aplicación de microorganismo efectivos

Producida la mezcla final, se obtuvieron los microorganismos efectivos de hojarasca, madera degradada y raíces; los cuales, se aplicaron en dosis de 5 L en los residuos sólidos orgánicos, utilizando una mochila fumigadora. Cabe precisar, que cada repetición se realizó por semana; culminando a las nueve semanas con las tres repeticiones por cada tratamiento.

Los microorganismos efectivos se aplicaron todos los días; mientras que el aserrín se agregaba en base a la humedad de la mezcla, 15 kg por semana. Las mezclas se removieron con una lampa, para que se oxigene la materia orgánica y los microorganismos efectivos actúen eficientemente para acelerar la degradación.

En la Figura 1 se detallan los tratamientos distribuidos con tres repeticiones cada uno.

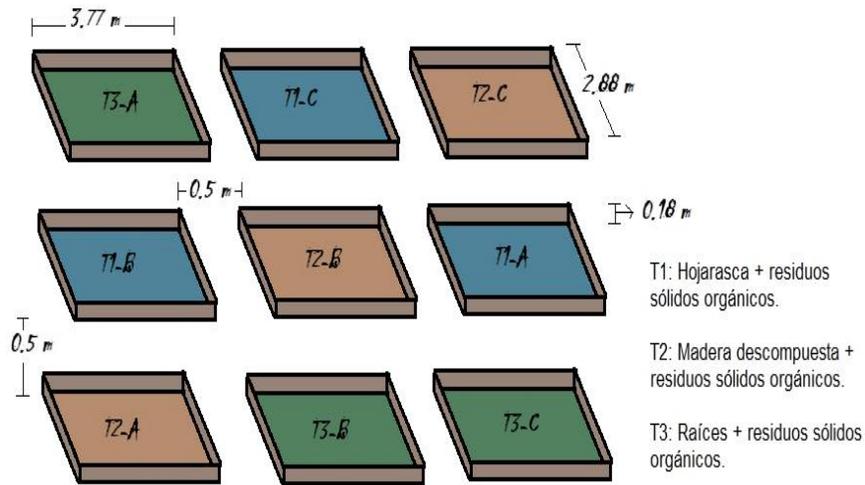


Figura 1. Distribución de los tratamientos y repeticiones en el área experimental.

Al tornarse las mezclas de un color marrón oscuro y al no emanar olor, se dedujo que los residuos sólidos orgánicos habrían sido descompuestos, produciéndose el compost (Docampo, 2014). En ese momento se determinó el periodo de degradación y el pH de cada tratamiento, utilizando para este último un pH-metro digital. Luego, se procedió a pesar el compost producido por tratamiento, utilizando la balanza analítica.

Los parámetros químicos de los composts, se determinaron después de realizar los volteos y de formar las pilas, de las cuales, de cada tratamiento y repetición se recolectaron muestras de 1 kg, y se colocaron en bolsas herméticas codificadas adecuadamente (Naranjo, 2013); siendo enviadas para su análisis al Laboratorio de Análisis de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Análisis estadístico

Las variables de periodo de degradación y parámetros químicos se analizaron en función de los valores promedios y la dispersión. Los resultados fueron analizados mediante estadísticos descriptivos con el programa SPSS V.20.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Obtención y periodo de degradación para producción de los composts

El Compost₂ es el que reportó mayor peso final, y por ende, mayor porcentaje de rendimiento (8.4 %) en comparación a los otros dos composts, superando en 6.4 % al Compost₃ y en 23.8 % al Compost₁ (Figura 2).

La diferencia entre los pesos iniciales, puede deberse a la presencia de tomates o frutas en ciertas recolecciones efectuadas, los cuales contienen gran contenido de agua. Los rendimientos de los tres composts refuerzan la idea de que el compostaje tiene una escasa eficiencia de degradación (Wang et al., 2024).

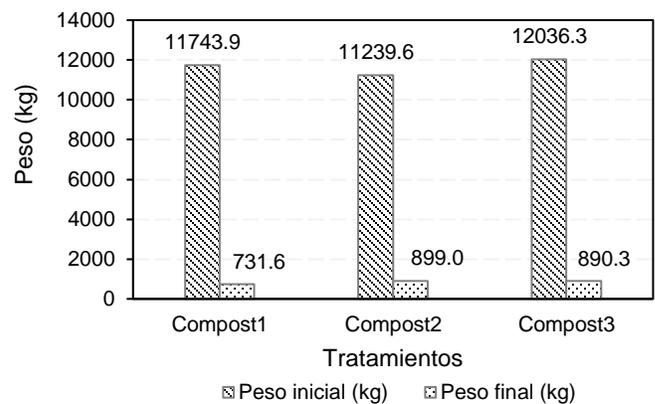


Figura 2. Peso inicial y final por tratamientos.

La prueba de Tukey al 5 % para la variable periodo de degradación para producción de los composts, indican que los tratamientos Compost₂, Compost₃ y Compost₁ son estadísticamente similares. Además, el Compost₁ es el que reportó menor periodo de degradación promedio, con 39.3 días, secundado por el Compost₃ que reportó 41.3 días, seguido por el Compost₂ que reportó 42.3 días. El periodo de degradación de los tres composts fue menos de dos meses, siendo un tiempo menor al tiempo normal, que es a los tres o seis meses, después de realizar movimientos continuos de la mezcla, siempre y cuando, la humedad se mantenga adecuadamente (Jaramillo-Henao y Zapata-Márquez, 2008).

Asimismo, los tiempos obtenidos son inferiores a los 45 días que reportaron Chaparro-Montoya et al. (2020), en su investigación con adición de microorganismos efectivos; mientras que el tiempo obtenido con el Compost₁ fue inferior a los 40 días que registraron Vásquez et al. (2010), en su investigación con adición de microorganismos nativos en residuos de pulpa de café. Sin embargo, los valores no se encuentran en el rango estipulado por Mahongnao et al. (2023), que oscila entre 20 y 40 días. Dichos estudios, refuerzan la complejidad de la actividad microbiana interviniente en las etapas del compostaje, dado a la variación continua de la temperatura, la diversidad de microorganismos y el pH; además, los microorganismos que en su mayoría se hallan en los procesos de compostaje son los actinomicetos y hongos, debido a que pueden biodegradar celulosa y algunos tolerar elevadas temperaturas (Farrell y Jones, 2009). Otros estudios mencionan que los actinomicetos, presentan actividad enzimática en la hidrólisis de pectina, celulosa, entre otras sustancias complejas (Tiquia, 2002). También, los actinomicetos termófilos *Streptomyces albogriseolus* y *S. thermovulgaris* que toleran altas temperaturas, las cuales son habitualmente hallados en los procesos de composta (Cuesta et al., 2012). Para acortar el tiempo de compostaje, existe una estrategia de precisión que incorpora bacterias funcionales producidas a partir de residuos del proceso de alimentos a un sistema de co-compostaje, lo que reduce también las emisiones de amoníaco (Wang et al., 2024). Aunque, también existen otras estrategias como el empleo de inóculo microbiano, la optimización de parámetros físicos y químicos, así como también los aditivos (Andraskar et al., 2023).

Parámetros químicos de los composts

En la Tabla 1 se muestran los parámetros químicos de los tres tipos de composts preparados en la

investigación. De acuerdo con la norma técnica peruana 201.208:2021 de fertilizantes y de compost a partir de residuos orgánicos municipales [INACAL (Instituto Nacional de Calidad), 2021], el Compost₁ es el que cumple con la mayor cantidad de parámetros químicos, específicamente en seis, que son el pH, materia orgánica, fósforo, calcio, cobre y zinc; mientras que el Compost₂ y el Compost₃ cumplieron en 5 parámetros, que son el pH, materia orgánica, nitrógeno, calcio, cobre y zinc. Generalmente, los pequeños valores de Cu y Zn posiblemente se deban a la composición de los residuos compostados o a su procesamiento (Garrido-Acosta et al., 2023); también, se debe considerar que el compost obtiene la madurez, donde se presentan menor la cantidad de microelementos y metales pesados (Wang et al., 2021).

La incorporación de microorganismos favorece el transporte pasivo de los metales pesados, incrementando su degradación y la producción de ácidos fúlvicos y húmicos, donde estos ácidos presentan la propiedad de unión entre los iones metálicos (Lalas et al., 2017). Asimismo, la no activación de metales pesados en el compost, se atribuye a causas microbianas como fisicoquímicas (Nuñez et al., 2023) y compuestos orgánicos (Song et al., 2021); donde, la mezcla de los compuestos húmicos y metales pesados no es reversible (Cao et al., 2021). Los resultados de la presente investigación reportan que el compost cumple con la norma técnica peruana. Sin embargo, los valores de Fe y Mn no se especifican por la norma técnica peruana, no contemplando rangos para dichos elementos; estudios en compost reportan valores de 1.54 a 5.29 mg kg⁻¹ de Fe y 239 a 304 mg kg⁻¹ de Mn (Florida et al., 2016; Jacobo et al., 2017); donde, se puede afirmar que el compost no presenta contaminación con metales pesados en los materiales compostados (Garrido-Acosta et al., 2023).

Tabla 1. Parámetros químicos de los composts.

Parámetros químicos	Valores			NTP 201.208:2021
	Compost ₁	Compost ₂	Compost ₃	
pH	7.40	7.20	7.60	6.5 - 8.5
Humedad (%)	19.98	18.54	14.75	35 - 50
Materia orgánica (%)	54.26	51.82	53.55	>20
N (%)	2.61	2.14	1.69	0.3 - 1.5
P ₂ O ₅ (%)	0.12	0.06	0.04	0.1 - 1.0
Ca (%)	2.44	2.42	2.62	2.0 - 6.0
K (%)	3.42	2.83	3.25	0.3 - 1.0
Mg (%)	0.10	0.09	0.10	0.2 - 0.7
Na (%)	0.57	0.55	0.57	No especifica
Cu (mg kg ⁻¹)	2.70	0.10	0.13	Máximo 250.0
Fe (mg kg ⁻¹)	0.23	0.01	0.29	No especifica
Zn (mg kg ⁻¹)	43.52	6.59	5.79	Máximo 1000.0
Mn (mg kg ⁻¹)	147.29	38.47	0.83	No especifica

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (2022).

La prueba de Tukey al 5 % para la variable pH de los composts, indican que los tratamientos Compost₂ y el Compost₃ son estadísticamente diferentes; pero no reporta diferencias estadísticas entre el Compost₂ con el Compost₁, ni entre el Compost₁ con el Compost₃. De acuerdo con Mahongnao et al. (2023), el compost no presenta un pH estable, el cual es ocho, resultando el valor más cercano el reportado por el Compost₃ con 7.60, secundado por el Compost₁ con 7.40 y seguido por el Compost₂ con 7.20.

La prueba de Tukey al 5 % para la variable porcentaje de humedad de los composts, indican que los tratamientos Compost₁, Compost₂ y el Compost₃ son estadísticamente similares. Además, el Compost₁ es el que reportó mayor porcentaje promedio de humedad con 19.88 %, secundado por el Compost₂ con 18.54 % y seguido por el Compost₃ con 14.75 %. El porcentaje de humedad de los tres composts no son lo adecuado, debido a que se encuentra por debajo del 40 %, en el cual, se inhibe a los microorganismos en su actividad metabólica (Belizario-Quispe, 2012). No obstante, Salamanca (2012), indica que ciertas calidades comerciales de compost reportan 15 % de humedad, por lo que sugiere reducir el contenido de humedad.

La prueba de Tukey al 5 % para la variable porcentaje de materia orgánica de los composts, indican que los tratamientos Compost₁, Compost₃ y el Compost₂ son estadísticamente similares. Además, el Compost₁ es el que reportó mayor porcentaje promedio de materia orgánica con 54.26 %, secundado por el Compost₃ con 53.55 % y seguido por el Compost₂ con 51.82 %. El porcentaje de materia orgánica de los tres composts son adecuados, ya que por debajo del 30 %, indica que el compost aún está mezclado con tierra, arena, cenizas u otro mineral; mientras que por encima del 60 %, los residuos orgánicos aún no están compostados adecuadamente (Ney et al., 2020).

La prueba de Tukey al 5 % para la variable porcentaje de nitrógeno de los composts, indican que los tratamientos Compost₁, Compost₂ y el Compost₃ son estadísticamente diferentes. Además, el Compost₁ es el que reportó mayor porcentaje promedio de nitrógeno con 2.61 %, secundado por el Compost₂ con 2.14 % y seguido por el Compost₃ con 1.69 %. De acuerdo con Céspedes (2010), los porcentajes de nitrógeno de los tres composts son adecuados, porque superan el 0.5 %. Además, Corbella y Fernández (2013) señalan que, el porcentaje de nitrógeno en residuos vegetales es bajo y oscila entre 1 a 6 %.

La prueba de Tukey al 5 % para la variable porcentaje de fósforo de los composts, indican que los tratamientos Compost₁, Compost₂ y el Compost₃ son estadísticamente diferentes. Además, el Compost₁ es el que reportó mayor porcentaje promedio de fósforo con 0.12 %, secundado por el Compost₂ con 0.06 % y seguido por el Compost₃ con 0.04 %. El porcentaje de fósforo del Compost₁ se encuentra dentro del rango de valores indicado por Moreno (2008), quien sugiere que, el porcentaje de fósforo debe oscilar entre 0.1 a 1.6 %, debido, a que su porcentaje está en función del porcentaje de materia orgánica y el pH del compost, porque la materia orgánica al ser descompuesta libera gran contenido de ácidos orgánicos que solubilizan a los fosfatos; además, el pH permite que el aluminio y el hierro sean neutralizados y favorezcan la movilización del fósforo (Betencourt et al., 2012).

La prueba de Tukey al 5 % para la variable porcentaje de calcio de los composts, indican que el tratamiento Compost₃ es estadísticamente diferente al Compost₁ y al Compost₂; mientras que estos dos composts son estadísticamente similares. Además, el Compost₃ es el que reportó mayor porcentaje promedio de calcio con 2.62 %, secundado por el Compost₁ con 2.44 % y seguido por el Compost₂ con 2.42 %. El porcentaje de calcio de los tres composts se consideran bajos en opinión de Moreno (2008), quien señala que, los niveles de calcio para los composts deben situarse en un rango de 6 a 11 %.

La prueba de Tukey al 5 % para la variable porcentaje de potasio de los composts, indican que los tratamientos Compost₁, Compost₃ y el Compost₂ son estadísticamente diferentes. Además, el Compost₁ es el que reportó mayor porcentaje promedio de potasio con 3.42 %, secundado por el Compost₃ con 3.25 % y seguido por el Compost₂ con 2.83 %. El potasio tiene relación con el porcentaje de materia orgánica, y deben ubicarse en el rango de 0.4 a 1.6 % (Moreno, 2008; FAO, 2009); por lo cual, ninguno de los composts cumple con dichos valores.

La prueba de Tukey al 5 % para la variable porcentaje de magnesio de los composts, indican que los tratamientos Compost₁, Compost₃ y el Compost₂ son estadísticamente similares. Además, el Compost₁ y el Compost₃ son los que reportaron mayor porcentaje promedio de magnesio con 0.10 %, respectivamente; mientras que el Compost₂ reportó 0.09 % de magnesio. Al igual que en la investigación de Ramos (2015), los microorganismos efectivos no reportan gran acción en el porcentaje de magnesio de los composts.

La prueba de Tukey al 5 % para la variable porcentaje de sodio de los composts, indican que los tratamientos Compost₁, Compost₃ y el Compost₂ son estadísticamente similares. Además, el Compost₁ y el Compost₃ son los que reportaron mayor porcentaje promedio de sodio con 0.57 %, respectivamente; mientras que el Compost₂ reportó 0.55 % de sodio. Similar a lo sucedió en la investigación de Ramos (2015), los microorganismos efectivos no reportan gran acción en el porcentaje de sodio de los composts.

La prueba de Tukey al 5 % para la variable contenido de cobre de los composts, indican que el tratamiento Compost₁ es estadísticamente diferente al Compost₃ y al Compost₂; mientras que estos dos composts son estadísticamente similares. Además, el Compost₁ reportó mayor contenido promedio de cobre con 2.70 mg kg⁻¹, secundado por el Compost₃ con 0.13 mg kg⁻¹ y seguido por el Compost₂ con 0.10 mg kg⁻¹. Se reportó contenidos de cobre, debido a que este metal es de los que más abundan en las cáscaras de frutas y los basaltos (Baltodano y Sotomayor, 2002).

La prueba de Tukey al 5 % para la variable contenido de hierro de los composts, indican que los tratamientos Compost₃, Compost₁ y el Compost₂ son estadísticamente diferentes. Además, el Compost₃ es el que reportó mayor contenido promedio de hierro con 0.29 mg kg⁻¹, secundado por el Compost₁ con 0.23 mg kg⁻¹ y seguido por el Compost₂ con 0.01 mg kg⁻¹. Se reportó contenidos de hierro, debido a que este metal es de los que más abundan en las cáscaras de frutas y los basaltos (Baltodano y Sotomayor, 2002).

La prueba de Tukey al 5 % para la variable contenido de zinc de los composts, indican que el tratamiento Compost₁ es estadísticamente diferente al Compost₂ y al Compost₃; mientras que estos dos composts son estadísticamente similares. Además, el Compost₁ es el que reportó mayor contenido promedio de zinc con 43.52 mg kg⁻¹, secundado por el Compost₂ con 6.59 mg kg⁻¹ y seguido por el Compost₃ con 5.79 mg kg⁻¹. Se reportó contenidos de zinc, debido a que este metal es de los que más abundan en las cáscaras de frutas y los basaltos (Baltodano y Sotomayor, 2002).

La prueba de Tukey al 5 % para la variable contenido de manganeso de los composts, indican que los tratamientos Compost₁, Compost₂ y el Compost₃ son estadísticamente diferentes. Además, el Compost₁ es

el que reportó mayor contenido promedio de manganeso con 147.29 mg kg⁻¹, secundado por el Compost₂ con 38.47 mg kg⁻¹ y seguido por el Compost₃ con 0.83 mg kg⁻¹. Se reportó contenidos de manganeso, debido a que este metal es de los que más abundan en las cáscaras de frutas y los basaltos (Baltodano y Sotomayor, 2002).

Tal como se indicó en la metodología, se reportaron colonias de microorganismos aerobios viales (bacterias termófilas) y actinomicetos, quienes, en relación a la cantidad inicial, registraron un incremento a las siguientes cantidades: hojarasca (2 034.7 x 10³ UFC g⁻¹ de microorganismos aerobios viales y 21.7 x 10³ UFC g⁻¹ de actinomicetos), madera degradada (2 008.7 x 10³ UFC g⁻¹ de microorganismos aerobios viales y 61.7 x 10³ UFC g⁻¹ de actinomicetos) y raíces (1 349.3 x 10³ UFC g⁻¹ de microorganismos aerobios viales y 2.7 x 10³ UFC g⁻¹ de actinomicetos). Los mencionados microorganismos influyeron en el proceso biológico oxidativo; mejorando las características físicas, químicas y biológicas del compost (Labrador, 2001; Condori, 2020); información que es similar a la de Bhimani et al. (2024), quien reportó que el compost que produjo contenía mayores poblaciones de bacterias heterótrofas cultivables (1.3 x 10⁸) y bacterias celulolíticas (4 x 10⁶), los cuales se destacan por su potencial para degradar los desechos microbianos y para producir enzimas.

A pesar que no se reportó valores de índice de fertilidad, ni de la relación C:N; el compost₁ que resultó de la mezcla de residuos sólidos orgánicos con hojarasca reportó mejores resultados, concordando de alguna forma con Mahongnao et al. (2023), quien señala que, el compost de residuos foliares es un recurso biológico valioso con gran valor nutritivo, que es favorable para su empleo en la agricultura ecológica; porque reporta un índice de fertilidad alto (4.06); el cual, es un índice que se evalúa en función a los parámetros tales como: carbono total, nitrógeno total, relación C:N, contenido de fósforo, potasio y azufre.

Finalmente, los microorganismos efectivos en conjunto con los residuos sólidos orgánicos brindan buenos resultados; quizás similares a los resultados de la mezcla de microorganismos eficaces nativos con el estiércol de pollo, el cual mejora la degradación de la lignocelulosa, además de reducir el tiempo del proceso de compostaje e incrementó la calidad del compost (Ghasemzadeh et al., 2022).

CONCLUSIONES

La utilización de microorganismos efectivos provenientes de diversas fuentes (hojarasca, madera degradada o raíces) son cruciales para mejorar la degradación de residuos sólidos orgánicos durante el proceso de compostaje. Este enfoque no solo acelera la descomposición de los residuos sólidos orgánicos, sino que también optimiza los parámetros químicos del compost resultante, como el contenido de nutrientes esenciales. Estos hallazgos subrayan la importancia de seleccionar adecuadamente la hojarasca para la obtención de los microorganismos efectivos y obtener compost de alta calidad, con mayores contenidos de macro y micronutrientes, aptos para su uso en agricultura.

BIBLIOGRAFÍA

- Ali, H; Leta, S; Hussien, A; Alemu, T. 2023. Resource recovery potential from source - separated organic municipal solid waste: opportunities for organic fertilizer production and creating sustainable urban agriculture in Etiopia (en línea). *J Mater Cycles Waste Manag*, 25:2417-2430. Consultado 13 feb. 2024. Disponible en <https://www.springerprofessional.de/en/resource-recovery-potential-from-source-separated-organic-municipi/25416950>
- Andraskar, J; Yadav, S; Khan, D; Kapley, A. 2023. Treatment options for municipal solid waste by composting and its challenges (en línea). *Indian J Microbiol*, 63:235-243. Consultado 09 oct. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s12088-023-01087-4>
- Baltodano, M; Sotomayor, F. 2002. Evaluación de manejo de desechos orgánicos domésticos en la EARTH (en línea). UNIVERSIDAD EARTH. Consultado 15 feb. 2024. Disponible en <https://studylib.es/doc/7302783/evaluaci%C3%B3n-de-manejo-de-desechos-org%C3%A1nicos-dom%C3%A9sticos-en-la>
- Belizario-Quispe, N. 2012. Microorganismos eficaces (EM) en la descomposición del estiércol de alpaca para el abonamiento de los bofedales altoandinos (en línea). Universidad Nacional del Altiplano. Escuela de Post Grado. Consultado 25 oct. 2023. Disponible en https://1library.co/document/z1d9043z-microorganismos-eficaces-descomposicion-estiercol-alpaca-abonamiento-bofedales-altoandinos.html#google_vignette
- Betencourt, E; Duputel, M; Coloma, B; Desclaux, D; Hinsinger, P. 2012. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil (en línea). *Soil Biol. Biochem*, 46(1):181-190. Consultado 27 ene. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.11.015>
- Bhimani, AA; Bhimani, HD; Vaghela, NR; Gohel, SD. 2024. Cultivation methods, characterization, and biocatalytic potential of organic solid waste degrading bacteria isolated from sugarcane rhizospheric soil and compost (en línea). *Biología*, 79:953-974. Consultado 25 sept. 2023. Disponible en https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2024Biolog..79..953B/doi:10.1007/s11756-023-01592-3
- Callisaya, Y; Fernández, CM. 2017. Evaluación del efecto que tienen los microorganismos eficientes (EM), en el cultivo de pepinillo (*Cucumis sativus* L.), municipio de Achocalla. *Apthapi* 3(3):652-666. Consultado 18 feb. 2023. Disponible en <https://apthapi.umsa.bo/index.php/ATP/article/view/182>
- Cao, Y; Wang, X; Zhang, X; Misselbrook, T; Bai, Z; Ma, L. 2021. An electric field immobilizes heavy metals through promoting combination with humic substances during composting (en línea). *Bioresource Technology*, 330:124996. Consultado 07 feb. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124996>
- Casimiro, HJ. 2022. Abundancia de macrofauna del suelo en dos sistemas agroforestales en el fundo Alborada, distrito Castillo Grande - provincia Leoncio Prado (en línea). Universidad Nacional Agraria de La Selva. Facultad de Recursos Naturales Renovables. Consultado 12 oct. 2023. Disponible en <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstream/s/973ba04c-0e37-4a75-b45b-8dc0384907d7/content>
- Céspedes, C. 2010. Elaboración de compost. Seminario Internacional sobre Manejo Integrado de Moscas de Importancia Sanitaria y de Residuos Asociados a las Actividades Agropecuarias. Arica, Chile. 4 p.
- Chaparro-Montoya, EE; Vera-Alcázar, MM; Herrera-Córdova, FB; Barahona-Sánchez, JC. 2020. Utilización de microorganismos eficientes para la elaboración de compost a partir de residuos orgánicos (en línea). *Sicretismo*, 1(1). Consultado 05 feb. 2024. Disponible en <https://revistas.unam.edu.pe/index.php/sincretismo/artic/e/view/15>
- Chen, Y; Wang, H; Ghofrani-Isfahani, P; Gu, L; Liu, X; Dai, X. 2024. Electronic regulation to achieve efficient anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): strategies, challenges and potential solutions (en línea). *Front. Environ. Sci. Eng*, 18, 52. Consultado 19 feb. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11783-024-1812-7>
- Condori, X. 2020. Identificación y clasificación de microorganismos eficientes del suelo, en la Estación Experimental Patacamaya (en línea). Tesis Lic. Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. Consultado 10 oct. 2023. Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/24902/T-2770.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Corbella, R; Fernández, J. 2013. Materia orgánica del suelo. Cátedra de Edafología. Tucumán, Argentina. Universidad Nacional de Tucumán. 10 p.
- Cuesta, G; García-de-la-Fuente, R; Abad, M; Fornes, F. 2012. Isolation and identification of actinomycetes from a compost-amended soil with potential as biocontrol

- agents (en línea). *Journal of Environmental Management*, 95 Suppl, S280-S284. Consultado 22 nov. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.023>
- De los Ángeles, M; Ruiz, J; Torres, V. 2005. Efecto del polvo de arroz en el consumo y la digestibilidad de raciones integrales basadas en saccharina rústica para ovinos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 39(4), 575-580.
- Docampo, R. 2014. Guía de compostaje en pequeña escala. *Rev. INIA Uruguay*. (38):46-49.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2009). Guía para el manejo eficiente de la nutrición de las plantas. Roma, Italia.
- Fan, Y; Lee, CT; Klemešm, JJ; Chua, LS; Sarmidi, MR; Leow, CW. 2018. Evaluation of effective microorganisms on home scale organic waste composting. *Journal of Environmental Management*, 216:41-48.
- Farrell, M; Jones, DL. 2009. Critical evaluation of municipal solid waste composting and potential compost markets (en línea). *Bioresource Technology*, 100(19):4301-4310. Consultado 07 ene. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.029>
- Florida, N; Reátegui, F; Pocomucha, V. 2016. Caracterización del compost a base de plumas de pollos (*Gallus gallus domesticus*) y otros insumos (en línea). *Investigación y Amazonía*, 6(2):1-5. Consultado 09 feb. 2024. Disponible en <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/124/109>
- Garrido-Acosta, L; Florida-Rofner, N; Nazar-Cipriano, J; Rengifo-Rojas, A. 2023. Calidad del compost a base de residuos orgánicos urbanos en Leoncio Prado, Perú. *Revista Producción + Limpia*, 18(1):118-137.
- Ghasemzadeh, S; Sharafi, R; Salehi, G; Karimi, E; Ardakani, MR; Vazan, S. 2022. Efficient lignocellulose degradation during rice straw composting with native effective microorganisms and chicken manure (en línea). *Org. Agr.* 12:397-409. Consultado 07 feb. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s13165-022-00397-z>
- INACAL (Instituto Nacional de Calidad). 2021. Normas técnicas peruanas. NTP 201.208:2021. Fertilizantes. Compost a partir de residuos sólidos orgánicos municipales. Requisitos, 1ª Edición.
- Jabeen, F; Adrees, M; Ibrahim, M; Waqas, M; Mahmood, A; Noreen, U; Aslam, A. 2023. Characterization for optimizing the integrated management of solid waste for energy recovery and circular economy (en línea). *Environ Sci Pollut Res*. Consultado 06 oct. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30980-0>
- Jacobo, M; Figueroa, U; Maciel, SP; López, LL; Muñoz, JA. 2017. Elementos menores en composta producida a partir de estiércol de engorda y rastrojo de maíz (en línea). *Agrofaz*, 17(2)61-71. Consultado 27 nov. 2023. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6512475>
- Jaramillo-Henao, G; Zapata-Márquez, LM. 2008. Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia (en línea). Universidad Nacional de Antioquía. Facultad de Ingeniería. Consultado 29 nov. 2023. Disponible en <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/45/1/AprovechamientoRSOUenColombia.pdf>
- Khuntia, HK; Paliwal, A; Kumar, DR; Chanakya, HN. 2022. Review on solid - state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass and organic solid waste (en línea). *Environ Monit Assess*, 194, 514. Consultado 23 oct. 2023. Disponible en https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2022EMnAs.194..514K/doi:10.1007/s10661-022-10160-2
- Labrador, J. 2001. *Materia orgánica en los agrosistemas, La - Tapa blanda*. Primera edición. Madrid, España. Ministerio Agricultura (ed). 294 p. ISBN 13: 9788449105104.
- Lalas, S; Athanasiadis, V; Dourtoglou, VG. 2017. Humic and Fulvic Acids as Potentially Toxic Metal Reducing Agents in Water (en línea). *Clean Soil Air Water*, 1700608. Consultado 18 mar. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1002/clen.201700608>
- Luo, Y; Shen, J; Wang, X; Xiao, H; Yaser, AZ; Fu, J. 2023. Recent advances in research on microbial community in the composting process (en línea). *Biomass Conv. Bioref*. Consultado 18 feb. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04616-9>
- Mahongnao, S; Sharma, P; Singh, D; Ahamad, A; Kumar, PV; Kumar, P; Nanda, S. 2023. Formation and characterization of leaf waste into organic compost. *Environ Sci Pollut Res* 30, 75823-75837.
- Matías-Ramos, M; Hidalgo-Moreno, C; Fuentes-Ponce, M; Delgadillo-Martínez, J; Dionisio, J. 2023. Potencial de especies de leguminosas mejoradoras de la fertilidad del suelo en regiones tropicales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(4):531-541.
- Melendrez, NA; Sánchez, J. 2019. Compostaje de residuos sólidos orgánicos utilizando microorganismos eficientes en el distrito de Cacatachi. Universidad Peruana Unión. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- Miyashiro, I. 2014. Calidad de seis formulaciones de compost enriquecido con guano de islas (en línea). Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias. Consultado 12 oct. 2023. Disponible en <https://1library.co/document/y9grr2dq-calidad-seis-formulaciones-compost-enriquecidos-con-guano-islas.html>
- Moreno, J. 2008. *Compostaje*. Primera edición. Madrid, España. Mundi-Prensa (ed). 570 p. ISBN: 8484763463, 9788484763468.
- Naranjo, EI. 2013. Aplicación de microorganismos para acelerar la transformación de desechos orgánicos en compost (en línea). Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Agronómica. Consultado 23 feb. 2024. Disponible en <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/5310/1/Tesis-52%20%20Ingenier%20c3%ada%20Agron%20c3%b3mica%20-CD%20173.pdf>

- Ney, L; Franklin, D; Mahmud, K; Cabrera, M; Hancock, D; Habteselassie, M; Newcomer, Q; Dahal, S. 2020. Impact of inoculation with local effective microorganisms on soil nitrogen cycling and legume productivity using composted broiler litter. *Applied Soil Ecology*. 154, 103567.
- Núñez, W; Sotomayor, D; Ballardo, C; Herrera, E. 2023. Fungal biomass potential: production and bioremediation mechanisms of heavy metals from municipal organic solid waste compost. *Scientia Agropecuaria Web*, 14(1):79-91.
- Peralta-Antonio, N; Bernardo, G; Watthier, M; Silva, RH. 2019. Compost, bokashi y microorganismos eficientes: sus beneficios en cultivos sucesivos de brócolis. *Idesia (Arica)*, 37(2):59-66.
- Radhakrishnan, T; Manimekalan, A; Ramaswamy, SP; Naveen, K; Meena, PS; Pragasan, A. 2024. Cognizing waste: a comprehensive quantitative and characterization analysis of municipal solid waste in Coimbatore City Municipal Corporation, India. *J Mater Cycles Waste Manag.*
- Ramos-Lopez, JW. 2019. Producción de fosfo compost a partir de heces humanas y sólidos orgánicos del mercado de Chanin distrito y provincia de Acobamba – Huancavelica (en línea). Universidad Nacional de Huancavelica. Facultad de Ciencias Agrarias. Consultado 25 oct. 2023. Disponible en <https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/0ab85f32-77a2-4d33-91b2-ecf71ef0113/content>
- Ramos, PE. 2015. Evaluación de diferentes sustratos de materias orgánicas y con microorganismos eficientes en la preparación de compost, en la zona de Pangoa – Perú (en línea). Universidad Nacional del Centro Del Perú. Facultad de Ciencias Agrarias. Consultado 05 nov. 2023. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.12894/1908>
- Salamanca, S. 2012. Compostaje de residuos industriales en Colombia. *Revista Tecnicaña*, 28:13-18.
- Saluja, S; Gaur, A; Somani P; Ahmad, K. 2024. Innovative approach to waste management: utilizing stabilized municipal solid waste in road infrastructure. *Environ Sci Pollut Res*, 31:10346-10358.
- Sanclemente, O; García, M; Valencia, F. 2011. Efecto del uso de melaza y microorganismos eficientes sobre la tasa de descomposición de la hoja de caña (*Saccharum officinarum*). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 2(2):13-19.
- Song, C; Zhao, Y; Pan, D; Wang, S; Wu, D; Wang, L; Hao, J; Wei, Z. 2021. Heavy metals passivation driven by the interaction of organic fractions and functional bacteria during biochar/montmorillonite-amended composting (en línea). *Bioresource Technology*, 329:124923. Consultado 11 nov. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124923>
- Soriano, JA. 2016. Tiempo y calidad del compost con aplicación de tres dosis de microorganismos eficaces – Concepción (en línea). Universidad Nacional del Centro del Perú. Facultad de Ciencias Forestales y del Ambiente. Consultado 03 oct. 2023. Disponible en <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3487/Soriano%20Vilcahuman.pdf>
- Sultana, M; Jahiruddin, M; Kibria, MG; Hosenuzzaman, M; Abedin, M. 2023. Applying organic amendment enriches nutrient status of municipal solid waste compost and its application enhances tuber yield and nutrient concentrations of potato (en línea). *Waste Dispos. Sustain. Energy*. 5:439-450. Consultado 08 oct. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s42768-023-00142-6>
- Tiquia, S. 2002. Evolution of extracellular enzyme activities during manure composting (en línea). *Journal of Applied Microbiology*, 92(4):764-775. Consultado 09 nov. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2002.01582.x>
- Vásquez, M; López, A; Fuentes, B; Cote, E. 2010. Aceleración del proceso de compostaje de residuos post-cosecha (pulpa) del café con la aplicación de microorganismos nativos. *Redalyc*.
- Wang, H., Liu, Z., Wang, X., Zhang, L., Wu, X., Li, S., Cao, Y., & Ma, L. (2024). Precision co-composting of multi-source organic solid wastes provide a sustainable waste management strategy with high eco-efficiency: a life cycle assessment (en línea). *Environ Sci Pollut Res*. Consultado 04 dic. 2023. Disponible en <https://repositorio.udes.edu.co/entities/publication/5e3c1e57-d4a7-479e-b0b2-0b48a4a10405>
- Wang, L; Liu, H; Prasher, SO; Ou, Y; Yan, B; Zhong, R. 2021. Effect of inorganic additives (rock phosphate, PR and boron waste, BW) on the passivation of Cu, Zn during pig manure composting (en línea). *Journal of Environmental Management*, 285:112101. Consultado 11 dic. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112101>

Artículo recibido en: 07 de mayo 2024

Aceptado en: 23 de agosto 2024