

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

Evaluación del Efecto del Biocarbón en el Co-ompostaje de Estiércol de Pollo y Co-sustrato en Condiciones Ambientales del Páramo de Berlín.

Karen Yuset Vides Martinez y Jessica Nathalia Vargas Ravelo

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero(a) Civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Ing. Sanitario, MSc, PhD

Codirector

Brayan Alexis Parra Orobio

Ing. Sanitario, MSc, PhD

Maria Fernanda Rios Mercado

Ing.Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Este trabajo esta dedicado a mis padres, quienes me apoyaron y acompañaron a lo largo de todo mi proceso, gracias por su amor incondicional, su esfuerzo incansable y por acompañarme en cada paso de este camino, este logro también es suyo.

A la persona más especial de mi vida, quien ha estado a mi lado desde mis inicios en la carrera. Compañero, amigo y pareja, gracias por tu apoyo constante, tu fe en mí y por compartir conmigo cada desafío y cada alegría. Tu presencia ha sido luz en este proceso y fuerza en los momentos difíciles.

Karen Yuset Vides Martinez

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

Dedicatoria

A todas las personas que, de una u otra forma, fueron parte de este proceso. Cada gesto, palabra o ayuda que me brindaron dejó huella en este logro.

Jessica Nathalia Vargas Ravelo

Agradecimientos

Las autoras deseamos expresar nuestro sincero agradecimiento a nuestro director y codirectores Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Brayan Alexis Parra Orobio y Maria Fernanda Rios Mercado por su orientación, apoyo y conocimientos brindados durante todo el proceso de desarrollo de este proyecto de investigación.

También expresamos nuestro agradecimiento al Grupo de Investigación en Recurso Hídrico y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) por su valioso apoyo. Asimismo, agradecemos a la UIS por el financiamiento otorgado para la ejecución del proyecto. Extendemos un especial reconocimiento a las instituciones y personas que colaboraron en el desarrollo experimental y en el análisis de los resultados, cuya contribución fue fundamental para la realización de este trabajo.

Tabla de Contenido

	Pág.
1. Introducción	11
2. Objetivos.....	14
2.1.Objetivo General.....	14
2.2.Objetivos Específicos.....	14
3. Marco Referencial	15
3.1. Marco Teórico.....	15
3.1.1.Compostaje	15
3.1.2.Fases del Proceso de Compostaje	15
3.1.3. Factores que Afectan el Proceso de Compostaje	16
3.2. Marco de Referencia	17
3.2.1. Efecto del Biocarbón en las Propiedades Fisicoquímicas en el Compostaje de Estiércol de Pollo	17
4. Metodología.....	20
4.1.Fase I: Análisis del Efecto del Biocarbón en el Producto de Co-compostaje de Estiércol de Pollo con Co-sustrato de Residuos de Cebolla.	20
4.1.1 Montaje Experimental a Escala Piloto.....	20
4.1.2. Monitoreo y Toma de Muestras en el Montaje.....	21
4.2. Fase II: Análisis del Efecto del Biocarbón en el Producto Final de Co-compostaje de Estiércol de Pollo con Co-sustrato de Residuos de Cebolla.	22
4.2.1. Análisis de la Calidad del Producto	22

EFEECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

Análisis de los Datos.....	22
5. Resultados y Discusion	23
5.1. Monitoreo del Proceso	23
5.1.1. Temperatura	23
5.1.2. pH.....	26
5.1.3. Conductividad Eléctrica (CE)	27
5.1.4. Índice de Germinación (IG).....	29
5.1.5. Contenido de Carbono y Nitrógeno	30
6. Conclusiones	36
7. Recomendaciones	37
Referencias Bibliográficas	38

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Datos de biocarbón en el co-compostaje de estiércol de pollo y otros co-sustrato.....	18
Tabla 2: Composición de cada tratamiento.....	21
Tabla 3: Resultados finales de los parámetros evaluados en cada tratamiento.....	35

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Configuración de los tratamientos.....	20
Figura 2: Comportamiento de temperatura en los tratamientos TC y TB.....	24
Figura 3: Comportamiento de pH de los tratamientos TC y TB.....	26
Figura 4: Comportamiento de la CE en los tratamientos TC y TB.....	28
Figura 5: Evolución del índice de germinación (IG) en los tratamientos TC y TB.....	29
Figura 6: Contenido de carbono en los tratamientos TC y TB.....	30
Figura 7: Contenido de nitrógeno de los tratamientos	31

Resumen

Título: Evaluación del efecto del biocarbón en el co compostaje de estiércol de pollo y co-sustrato en condiciones ambientales del páramo de Berlín. *

Autor: Karen Yuset Vides Martinez, Jessica Nathalia Vargas-Ravelo **

Palabras Clave: compostaje; biocarbón; estiércol de pollo; co-compostaje; co-sustrato.

Descripción: El compostaje es una estrategia efectiva para el manejo sostenible de residuos orgánicos en ecosistemas de alta montaña, como el páramo de Berlín. En este estudio, se evaluó el efecto de la adición de biocarbón en el co-compostaje de estiércol de pollo y residuos de cebolla de rama a escala piloto. Se compararon dos tratamientos: un tratamiento control sin biocarbón (TC) y otro con biocarbón al 5% del peso seco (TB). Durante el proceso de compostaje, se monitorearon variables fisicoquímicas como temperatura, pH, conductividad eléctrica(CE), índice de germinación(IG) y humedad. Asimismo, en el producto final se analizaron parámetros como contenido de cenizas, carbono y nitrógeno totales, además de la presencia de enterobacterias como indicador microbiológico. Los resultados mostraron que la adición de biocarbón favoreció un aumento en la temperatura máxima del compostaje y un incremento en el pH, CE y IG en comparación con el tratamiento control. Ambos tratamientos cumplieron con la mayoría de los parámetros establecidos en la NTC 5167 para productos orgánicos utilizados como enmiendas. Sin embargo, el contenido de fósforo total en ambos tratamientos no alcanzó el mínimo exigido por la norma, lo que podría afectar la disponibilidad de este nutriente en aplicaciones agrícolas. En general, la mayoría de los parámetros analizados cumplieron con los estándares establecidos, lo que indica que el compost obtenido posee un potencial para su uso agrícola. Se concluye que el biocarbón puede mejorar la eficiencia del proceso y la estabilidad del compost. Sin embargo, su uso puede aumentar la conductividad eléctrica en la fase final del compostaje, lo que podría representar un riesgo para suelos sensibles a la salinidad si no se maneja adecuadamente.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas.

Escuela de ingeniería Civil. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Ing. Sanitario, MSc, PhD. Codirectores: Brayan Alexis Parra Orobio. Ing. Sanitario, MSc, PhD. María Fernanda Rios Mercado Ing. Civil.

Abstract

Title: Evaluation of the effect of biochar in the co-composting of chicken manure and co-substrate in environmental conditions of the Berlin moorland.*

Author: Karen Yuset Vides Martinez, Jessica Nathalia Vargas-Ravelo**

Key Words: composting; biochar; chicken waste; co-composting; co-substrate.

Description: Composting is an effective strategy for the sustainable management of organic waste in high mountain ecosystems, such as the Berlin páramo. In this study, the effect of adding biochar in the co-composting of poultry manure and ram onion waste was evaluated at a pilot-scale. Two treatments were compared: a control treatment without biochar (TC) and one with biochar at 5% of dry weight (TB). During the composting process, physicochemical variables such as temperature, pH, electrical conductivity, germination index, and moisture were monitored. Additionally, parameters such as ash content, total carbon and nitrogen, as well as the presence of enterobacteria as a microbiological indicator, were analyzed in the final product. The results showed that the addition of biochar favored an increase in the maximum temperature of composting and an increase in pH, CE y IG, compared to the control treatment. Both treatments met most of the parameters established in the Colombian standard NTC 5167 for organic products used as amendments. However, the total phosphorus content in both treatments did not reach the minimum required by the standard, which could affect the availability of this nutrient in agricultural applications. In general, most of the analyzed parameters met the established standards, indicating that the compost obtained has potential for agricultural use. It is concluded that biochar can improve the efficiency of the process and the stability of compost. However, its use may increase electrical conductivity in the final phase of composting, which could pose a risk to soils sensitive to salinity if not properly managed.

*Thesis

** Faculty of Physical and Mechanical

Engineering, School of Civil Engineering. Director: Édgar Ricardo Oviedo Ocaña, Sanitary Engineer, MSc, PhD. Co-directors: Brayan Alexis Parra Orobio, Sanitary Engineer, MSc, PhD. María Fernanda Ríos Mercado, Civil Engineer..

Introducción

Los páramos son ecosistemas de alta montaña únicos y esenciales para la regulación de los recursos hídricos, fundamentales en la agricultura y el suministro de agua potable (Delgado y Zarate, 2002; Gutiérrez-Salazar y Medrano-Vizcaíno, 2019). Estos ecosistemas abarcan los altos Andes tropicales, caracterizados por un clima frío y húmedo, con alta insolación y frecuente nubosidad. Sus altitudes varían desde los 3,000 msnm, donde las temperaturas promedio anuales rondan los 10°C, hasta los 4,600 msnm, donde pueden descender hasta 0°C (Gutiérrez-Salazar y Medrano-Vizcaíno, 2019). En los ecosistemas de páramo la prestación de servicios hídricos a las comunidades andinas, enfrenta grandes desafíos debido a la intensiva actividad agrícola (Evans et al., 2019). En estos territorios se producen cultivos como la cebolla de rama, la papa, la quinoa y la zanahoria (Arellano-P y Rangel-Ch, 2008; Rangel, 2000; Zia et al., 2013). Por ejemplo, en el páramo de Berlín en Colombia, la producción estimada de cebolla en rama alcanza las 180,000 toneladas al año, lo que implica una generación significativa de residuos agrícolas que no siempre son gestionados de manera adecuada (Oviedo-Ocaña et al., 2022), adicionalmente las prácticas agrícolas actuales, como el uso de agroquímicos sintéticos, estiércol de pollo inestable y riego inadecuado, representan una amenaza creciente para la seguridad hídrica (Zia et al., 2013).

El páramo de Berlín es uno de los ecosistemas más importantes del nororiente de Colombia. Se encuentra ubicado principalmente en los departamentos de Santander y Norte de Santander, abasteciendo a ciudades como Bucaramanga, Cúcuta y sus alrededores. El Páramo de Berlín se destaca la producción de cebolla larga, ya que se cultivan unas 1,500 hectáreas de cebolla,

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

generando unas 380 toneladas diarias (Domínguez et al., 2019), lo que conlleva a la generación de residuos agrícolas.

El compostaje es una estrategia eficaz para el aprovechamiento de estos residuos orgánicos, ya que permite convertirlos, a través de procesos metabólicos, en un producto denominado “compost maduro” (Sánchez-Monedero et al., 2019). Investigaciones previas han demostrado que el compostaje puede mejorarse a través de estrategias como la optimización de la relación carbono/nitrógeno, la selección de co-sustratos adecuados y la adición de enmiendas que mejoren la estabilización de los nutrientes (Lehmann et al., 2011; Thies y Rillig, 2012). El estiércol animal, contiene materia orgánica, es rico en nitrógeno y fósforo (Agyarko-Mintah et al., 2017; Drózdź et al., 2020), en particular el estiércol de pollo es aprovechable por medio del compostaje ya que se puede sacar beneficio de los nutrientes contenidos en este residuo animal, sin embargo, también puede contener contaminantes como metales pesados, enterobacterias (*Salmonella* spp., *Escherichia coli*), además de compuestos orgánicos volátiles y exceso de nutrientes que pueden afectar el ambiente. Por ello, es necesario un control adecuado del proceso de compostaje (Oviedo-Ocaña et al., 2022).

Agregar biocarbón al compostaje puede mejorar la aireación y la retención de agua debido a su alto contenido de carbono y su estructura porosa, que le confiere estas propiedades. (Cui et al., 2016), como también ayudar a reducir olores ofensivos al adsorber compuestos orgánicos volátiles (Thies y Rillig, 2012). Además, el biocarbón es una enmienda eficaz para aumentar el crecimiento de biodegradación, esto debido a que la adición de biocarbón puede provocar un aumento en la temperatura durante la fase termófila, como también mejorar la calidad del producto

EFFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

final, así como reducir los gases de efecto invernadero y las pérdidas de nutrientes durante el proceso de compostaje (Parra-Orobio et al., 2023).

Esta investigación evaluó el efecto de la adición de 5% de biocarbón en el co-compostaje de estiércol de pollo y un co-sustrato de cebolla en rama, a escala piloto, bajo las condiciones ambientales del páramo de Berlín, Colombia, en el proceso (fase mesofílica, termófila y de enfriamiento) como la calidad del producto final.

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

Objetivos

2.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de la adición de biocarbón en el proceso y producto del co-compostaje de estiércol de pollo y un co-sustrato, en las condiciones ambientales del Páramo de Berlín a escala piloto.

2.2. Objetivos Específicos

Seleccionar la dosis de biocarbón adecuada para el proceso de co compostaje a escala piloto, mediante una revisión de literatura.

Determinar la influencia del biocarbón sobre los parámetros de seguimiento durante el proceso del co-compostaje de estiércol de pollo con un co-sustrato a escala piloto.

Analizar el efecto del biocarbón en la calidad del producto final del co compostaje de estiércol de pollo con un co-sustrato a escala piloto.

3. Marco Referencial

3.1. Marco Teórico

3.1.1. *Compostaje*

La tecnología de compostaje ha emergido como una estrategia efectiva de gestión para transformar residuos orgánicos en compost, un producto valioso con una alta concentración de nutrientes y una baja presencia de microorganismos dañinos Sayara et al., (2020). El compost es comúnmente utilizado para mejorar la estructura del suelo, favorecer la retención de agua y aportar nutrientes a las plantas tales como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre que son esenciales para su crecimiento.

3.1.2. *Fases del Proceso de Compostaje*

El proceso de compostaje atraviesa cuatro etapas: mesofílica, termofílica, enfriamiento y finalmente culminan con la maduración del compost; estas etapas pueden ocurrir simultáneamente en lugar de consecutivamente Belyaeva y Haynes, (2009).

3.1.2.1. Fase Mesofílica. Durante esta fase, una combinación de bacterias, hongos y actinomicetos induce el metabolismo rápido de sustratos ricos en carbono. El proceso de compostaje comienza a temperatura ambiente y luego la temperatura aumenta a 45 °C, debido a que el metabolismo aeróbico produce calor. En esta fase el pH puede disminuir (hasta aproximadamente 4.0 o 4.5), dependiendo de los co-sustratos. Esta fase dura de dos a ocho días Meena et al., (2021).

3.1.2.2. Fase Termofílica. Cuando la temperatura alcanza niveles superiores a 45 °C, los microorganismos mesofílicos son reemplazados por microorganismos termofílicos que tienen la capacidad de crecer a temperaturas más altas. Estos microorganismos termófilos juegan un papel

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

crucial en la descomposición de materia orgánica compleja, como celulosa y lignina. Durante este proceso, la conversión del nitrógeno en amoníaco por parte de estos microbios aumenta el pH de la pila de compost Meena et al., (2021b). Específicamente, a temperaturas superiores a los 60°C, surgen bacterias productoras de esporas y actinobacterias que descomponen compuestos como ceras, hemicelulosa y otros componentes del complejo C. La elevada temperatura en esta etapa ayuda a eliminar contaminantes y microorganismos patógenos como *Escherichia coli*, *Salmonella* sp., quistes y huevos de helmintos, esporas de hongos fitopatógenos y semillas de malas hierbas, convirtiendo esta fase en un proceso de higienización. Además, la temperatura alta (más de 55°C) contribuye a eliminar esporas de hongos fitopatógenos, quistes de helmintos, semillas de malas hierbas y otras bacterias dañinas presentes en el material original, garantizando así un producto final higienizado Meena et al., (2021b).

3.1.2.3. Fase de Enfriamiento. Durante esta fase, después del agotamiento de fuentes de carbono y nitrógeno del material de compostaje, la temperatura de la pila disminuye nuevamente a unos 40-45 °C. A medida que la temperatura desciende por debajo de 40 °C, la actividad de los organismos mesofílicos se reanuda y el pH de la pila de compost disminuye ligeramente Meena et al., (2021b).

3.1.2.4. Fase de maduración. La temperatura de la pila de compost baja al nivel de la temperatura ambiente (20-30 °C) y durante esta fase ocurre la condensación de los compuestos carbonáceos y la polimerización, lo que ayuda aún más en la formulación de ácidos fúlvicos y húmicos Meena et al., (2021b).

3.1.3. Factores que afectan el proceso de compostaje

Por otro lado, existen factores que afectan el proceso de compostaje, parámetros que deben estar en un rango óptimo y bajo control. 1. Aireación 2. Dióxido de carbono 3. Humedad 4.

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

Temperatura 5. Relación Carbono-Nitrógeno (C:N) 6. pH 7. Tamaño de las partículas El primero es la aireación (Oxígeno), los requisitos de oxígeno varían durante el proceso, alcanzando la tasa más alta de consumo durante la fase termofílica.

3.2. Marco de Referencia

3.2.1. *Efecto del biocarbón en las propiedades fisicoquímicas en el compostaje de estiércol de pollo*

La Tabla 1 presenta una recopilación de estudios sobre el compostaje de estiércol de pollo con la adición de diferentes materias primas y dosis de biocarbón. La mayoría de las investigaciones han señalado que el biocarbón es altamente compatible con una amplia variedad de materiales orgánicos, con dosis habitualmente utilizadas entre el 1% y el 10%, resaltando los efectos del biocarbón en el proceso de compostaje. Duan et al., (2019) encontraron que la temperatura, el pH y la relación C/N presentan correlaciones significativas con la comunidad fúngica.

Por su parte, Agyarko-Mintah et al., (2017) reportaron que la adición de biocarbón en un porcentaje de 10% redujo las pérdidas de nitrógeno total (N) en un 51% y en un 60% las pérdidas de amoníaco (NH_3), lo que contribuyó a mejorar el valor fertilizante del compost final. Asimismo, Chung et al., (2021) evidenciaron una reducción significativa en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y NH_3 , así como en la presencia de patógenos microbianos. Además, se ha demostrado que la adición de biocarbón en un 10% disminuye las emisiones de NH_3 , sulfuro de hidrógeno (H_2S) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) (Awasthi et al., 2020; Dang et al., 2024)

EFFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

Tabla 1

Datos de biocarbón en el co-compostaje de estiércol de pollo y otros co-sustrato

Co-sustrato	% Biocarbón (peso seco)	Escala	Tamb (°C)	Periodo (días)	Conclusiones	Referencia
Paja de caña de azúcar	0%,10%	Piloto	26	60	Disminución de las emisiones de N_2O y CH_4 , aumento del TN en un 40%.	(Agyarko-Mintah et al., 2017)
Aserrín	0%,5%	Lab	20 < T < 25	42	Mejora la eliminación de genes de resistencia a antibióticos.	(Cui et al., 2016)
Paja de trigo	0%,2%,4% 6%, 8% y 10%	Piloto	-----	42	Mejoró el proceso de compostaje y contribuyó al valor sanitario de los productos finales.	(Duan et al., 2019)
Paja de trigo	5%,10% y 20%	Lab	25 < T < 30	28	En el tratamiento con 10% de biocarbón, la reducción de la materia orgánica fue un 6% mayor que en el control.	(N. Liu et al., 2017)
Aserrín	3%,5% y 10%	Lab	25 < T < 30	50	El biocarbón contribuye a la reducción de patógenos como <i>Escherichia coli</i> y <i>Salmonella spp.</i>	(Chung et al., 2021)
Paja de maní	0%,10%	Lab	20 < T < 30	40	Aumentó la abundancia relativa de bacterias nitrificantes y desnitrificantes .	(Li et al., 2022)
Paja de trigo	0 %, 2 %, 4 %, 6 % y 10 %	Piloto	-----	42	Mejoró la diversidad bacteriana en el compostaje y ayudó a inmovilizar metales pesados como el cobre y el zinc.	(Zhou et al., 2021)
Tallos de maíz + astillas de madera	0%,10%	Lab	20 < T < 30	42	Aumentó el IG del compost final entre un 14.54 y un 19.49 %, disminuyendo las emisiones de CH_4 , N_2O , NH_3 , y H_2S .	(Dang et al., 2024)
Paja de trigo	0%,2%,4% 6%, 8% y 10%	Lab	-----	42	Efectividad del biocarbón en la conservación del carbono y el nitrógeno.	(Awasthi et al., 2020)

Nota: Lab: laboratorio, Tamb: condiciones de temperatura ambiente en las que se llevó a cabo el experimento

Por otro lado, Cui et al., (2016) y Duan et al., (2019) encontraron un aumento de la temperatura, debido a que la adición de biocarbón favorece la actividad microbiana, lo que acelera

EFFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

la degradación de la materia orgánica y prolonga la fase termofílica del compostaje, permitiendo alcanzar temperaturas más altas y sostenidas. Por su parte, Dang et al., (2024) determinaron que el índice de germinación (IG) del compost podía incrementarse entre un 14.54 % y un 19.49 %. De manera similar, Awasthi et al., (2020) y Zhou et al., (2021) coincidieron en que los tratamientos con biocarbón (TB) presentaban valores de IG más altos en el compost final en comparación con los tratamientos de control. Asimismo, Chung et al., (2021); Cui et al., (2016); Dang et al., (2024) y Zhou et al., (2021) concluyeron que la adición de biocarbón en los tratamientos resultaba en valores de pH más elevados en el compost final respecto al tratamiento de control, además de contribuir a un aumento en el pH inicial.

Si bien un mayor índice de descomposición puede acelerar el proceso de compostaje, una elevada diversidad microbiana contribuye a la degradación de contaminantes persistentes. Esto plantea la necesidad de encontrar un equilibrio entre la tasa metabólica y la diversidad microbiana, optimizando la dosis de biocarbón para maximizar sus beneficios. Estudios han indicado que concentraciones superiores al 10% pueden provocar una excesiva disipación de calor y pérdida de agua, afectando negativamente la estabilidad del compost Liu et al., (2017) .Por otro lado, una adición moderada de biocarbón (6%) ha sido identificada como la más efectiva para favorecer la abundancia de la comunidad bacteriana y mejorar la calidad del entorno de compostaje y la eficiencia del mismo Zhou et al., (2021). En conjunto, estos hallazgos sugieren que una dosis adecuada de biocarbón puede ayudar a equilibrar la diversidad microbiana y la actividad metabólica, destacando que niveles cercanos al 5% presentan resultados óptimos en términos de estabilidad y calidad del compost.

4. Metodología

4.1. Fase I: Análisis del Efecto del Biocarbón en el Producto de Co-compostaje de Estiércol de Pollo con Co-sustrato de Residuos de Cebolla.

4.1.1. Montaje Experimental a Escala Piloto

El experimento se realizó a escala piloto en el corregimiento de Berlín, del municipio de Tona (Santander), en la institución educativa Luz de la Esperanza. El ensamblaje del proyecto consistió en la disposición de pilas cónicas, de aproximadamente 0.8 m de altura y 1.5 m de diámetro, con mezclas de compostaje de 200 kg cada una posicionadas en un invernadero. Estas pilas estaban compuestas por una mezcla de estiércol de pollo, un co-sustrato seleccionado a través de un experimento previo (en este caso residuos de cebolla de rama), biocarbón y aserrín como material de soporte, con el propósito de proporcionar estructura y agregar carbono a la muestra. Se llevaron a cabo dos tratamientos distintos: un tratamiento de control (TC), sin biocarbón y un tratamiento con biocarbón (TB). Cada tratamiento se realiza por duplicado, lo que resulta en un total de 4 pilas de compostaje para el estudio. En la Tabla 2 se detallan las proporciones de mezcla de sustratos utilizados para cada pila y en la Figura 1 se representa una ilustración del montaje experimental.

Figura 1

Configuración de los tratamientos



EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

Tabla 1

Composición de cada tratamiento

	Porcentaje de material usado	Masa
TC	46% EP + 34% CR + 20% A	92 kg (EP) + 68 kg (CR) + 40 kg (A)
TB	44% EP + 32% CR + 19% A + 5% B	88 kg (EP) + 64 kg (CR) + 38 kg (A) + 10 kg (B)

Nota: TC: tratamiento control; TB: tratamiento biocarbón; EP: estiércol de pollo; CR: cebolla de rama; A: aserrín; B: biocarbón.

4.1.2. Monitoreo y Toma de Muestras en el Montaje

En esta etapa, se tomaron muestras en cuatro puntos opuestos dentro de cada pila (uno en el centro de la muestra y 4 alrededor de ella) para obtener una muestra compuesta integrada de 300 g aproximadamente para análisis de laboratorio, en donde se realizó un monitoreo detallado de humedad, conductividad eléctrica y pH en el proceso de compostaje. Los parámetros analizados se midieron de acuerdo con los métodos establecidos por la APHA [25] e ICONTEC [26].

La temperatura se midió dos veces al día durante las dos primeras fases y, posteriormente, una vez al día en las pilas, además, se realizaron mediciones de humedad, conductividad eléctrica y pH tres veces por semana para las primeras dos fases (mesofílica y termofílica) y para las fases de enfriamiento y maduración dos veces por semana. Los volteos manuales se realizaron en función del comportamiento de la temperatura y la humedad de la pila. A medida que se monitoreaba la humedad, se realizaban los volteos y se añadía agua según las necesidades de cada tratamiento, para evitar la compactación, la formación de grumos y homogeneizar el material.

EFEECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

Además, se realizó un análisis del índice de germinación en seis ocasiones durante las fases del proceso: inicial (día 0), termofílica (día 18), enfriamiento (día 33), maduración (día 47 y 66) y compost (día 77). También hay que considerar que, cuando la pila alcanzó la temperatura ambiente, se hicieron pruebas de autocalentamiento para determinar si el compost estaba maduro, esto mediante el ensayo de Rottegrade .

4.2. Fase II: Análisis del Efecto del Biocarbón en el Producto Final de Co-compostaje de Estiércol de Pollo con Co-sustrato de Residuos de Cebolla.

4.2.1. Análisis de la Calidad del Producto

Culminado el proceso de compostaje con un tamiz No.35 se tamizó el compost, de acuerdo con lo recomendado en por la NTC 5167 y se tomaron muestras para medir en laboratorio: pH, humedad (%), conductividad eléctrica CE (mS/cm), cenizas (%), nitrógeno total NT (%), fósforo total PT (%), carbono orgánico total COT (%), índice de germinación (%) y enterobacterias (UFC/g).

4.2.2. Análisis De Los Datos

El análisis de datos se llevó a cabo mediante técnicas estadísticas descriptivas e inferenciales, incluyendo análisis de varianza con un nivel de confianza del 95%. Estos análisis se realizaron utilizando el software Microsoft Excel versión 2024.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. Monitoreo Del Proceso

5.1.1. Temperatura

En la Figura 2 se muestra la variación de temperatura de los tratamientos TC y TB durante el proceso. En ambos tratamientos, las temperaturas experimentaron un incremento significativo en los primeros días. La fase mesofílica tuvo una duración de 2 días, y al tercer día, tanto TC como TB alcanzaron los 45.5°C. Posteriormente, las temperaturas continuaron en ascenso hasta aproximadamente el décimo día, alcanzando valores máximos de 54.4°C y 57°C, aunque no hubo diferencias estadísticamente significativas ($p=0.813$) entre tratamientos, TB se caracterizó por tener un mayor valor de temperatura. Este comportamiento es característico de la fase termofílica del compostaje, donde la temperatura suele superar los 45°C (Oviedo-Ocaña et al., 2022).

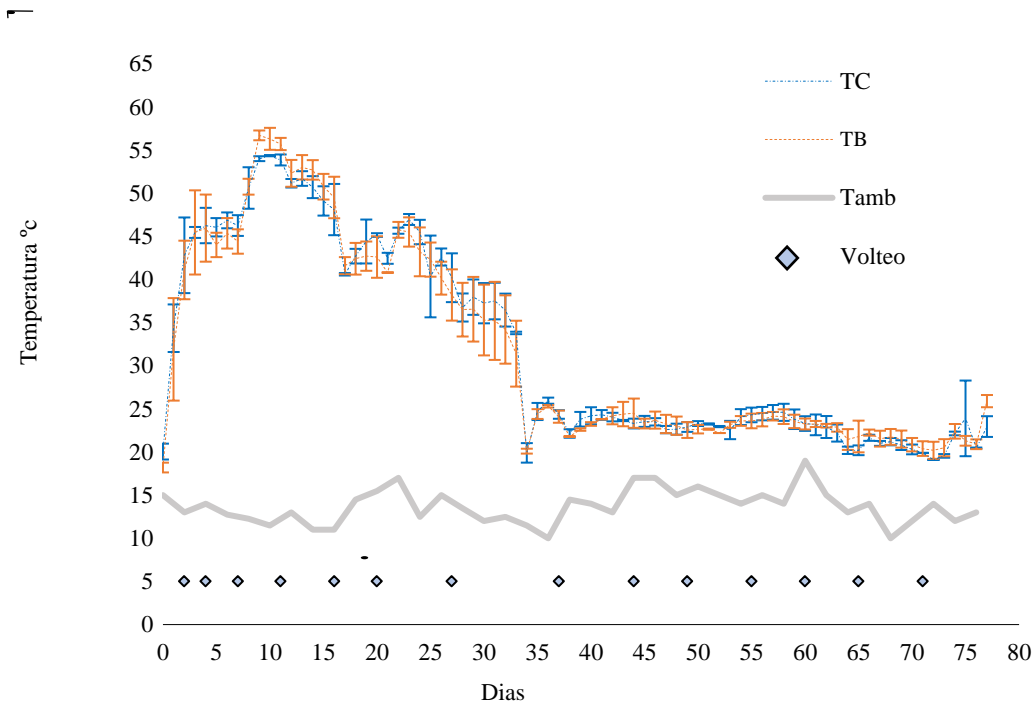
El mayor pico de temperatura en TB en comparación con TC se debe a la adición de biocarbón, cuyas propiedades favorecen el proceso de compostaje. En primer lugar, su estructura porosa mejora la aireación y el suministro de oxígeno, promoviendo un entorno más favorable para la actividad microbiana aeróbica. Además, el biocarbón actúa como regulador de humedad, ya que retiene el agua en su estructura sin generar condiciones excesivamente húmedas que podrían provocar zonas anaeróbicas. Esto permite mantener una mayor actividad microbiana, lo que acelera la degradación de la materia orgánica y genera más calor durante la fase termofílica. Estudios como los de Cui et al., (2016) y Liu et al., (2017), demostraron que la adición de biocarbón favorece un mayor incremento térmico y una estabilidad prolongada de la temperatura en el compostaje. En particular, encontraron que el biocarbón favorece la proliferación de

EFFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

microorganismos termofílicos y optimiza las condiciones del proceso, lo que podría explicar el mayor pico térmico observado en TB en comparación con TC.

Figura 2

Comportamiento de temperatura en los tratamientos TC y TB



La norma colombiana NTC5167 no exige para productos orgánicos utilizados como fertilizantes valores de temperatura como parámetro de calidad, sin embargo, considerando las condiciones ambientales en la que se realizó el experimento las temperaturas máximas registradas superaron las expectativas a lo esperado en ecosistemas de alta montaña, esto debido a que en climas fríos el proceso de compostaje puede verse inhibido, ya que se ve significativamente limitado por la temperatura exterior Hemidat et al., (2018), en los tratamientos TB y TC se pudo observar que se alcanzaron altas temperaturas a pesar de las bajas temperaturas ambientales del páramo de Berlín, la adición de biocarbón mejora la retención de calor en el compostaje en las condiciones ambientales de un páramo, además, una adecuada relación C/N y el control de la

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

aireación favorecen la actividad de microorganismos termofílicos, que generan calor en el proceso(Oviedo-Ocaña et al., 2022).

Según Hemidat et al., (2018), temperaturas superiores a 55°C contribuyen a la eliminación de esporas de hongos fitopatógenos, semillas de malas hierbas y bacterias dañinas presentes en el material original, asegurando así un producto final higienizado. En el tratamiento TB se evidenció que la temperatura se mantuvo consistentemente por encima de los 55 °C durante tres días consecutivos, como era esperado, a diferencia de TC que no alcanzó dicho rango de temperatura, por lo cual TB pudo ser más efectivo para la higienización que TC.

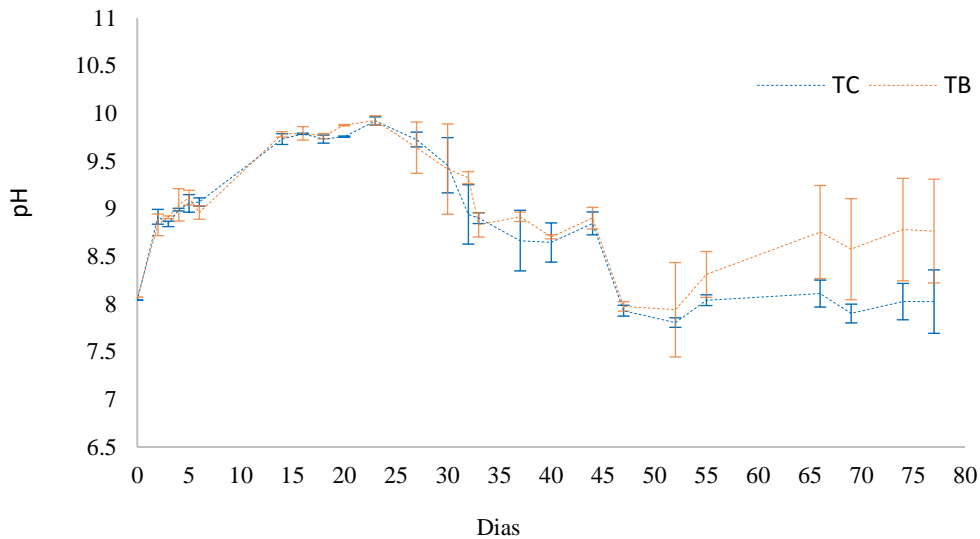
Entre los días 15-20 se observó una fluctuación de temperaturas que, si bien se estimaba que ya los tratamientos estaban entrando a su fase de enfriamiento, se evidenció un repentino aumento de temperatura manteniéndose en valores por encima de 40°C, seguido de un descenso más controlado en el cual ya las temperaturas siguieron teniendo valores cada vez más bajos, lo que confirmó la entrada a esta fase. Este comportamiento pudo ser ocasionado debido a la variación de temperatura ambiente del páramo observada en esos días, ya que las bajas temperaturas ambientales típicas podrían maximizar la pérdida de calor y restringir la actividad microbiana y una elevación de estas como también la realización de los volteos manuales realizados los días 16 y 20, pudieron ayudar a la reactivación de organismos termofílicos que aumentaron la temperatura en las pilas. Durante la fase de enfriamiento y maduración los tratamientos tuvieron comportamientos muy similares descendiendo hasta temperaturas entre 20°C y 25°C durante 43 días.

5.1.2. pH

La Figura 3 muestra el comportamiento del pH en los tratamientos de compostaje TC y TB. Ambos tratamientos comienzan con un pH cercano a 8.0, el cual aumenta progresivamente hasta alcanzar valores cercanos a 9.0. Este incremento en el pH podría estar asociado a la liberación de amoníaco (NH_3), derivada de la degradación de proteínas presentes en el estiércol de pollo y la cebolla en rama. En la etapa inicial del compostaje, el proceso de amonificación contribuye a una alta emisión de NH_3 , impulsada por la descomposición de la materia orgánica y la intensa actividad microbiana Liu et al., (2017). Según Chung et al., (2021), la acumulación de NH_3 en las primeras fases del compostaje se debe a la rápida degradación de los compuestos nitrogenados y la volatilización del amoníaco.

Figura 3

Comportamiento de pH de los tratamientos TC y TB



En la etapa termofílica ambos tratamientos tuvieron un comportamiento similar, con picos de pH alcalino entre 9.8-10. En la fase de enfriamiento, la temperatura empieza a disminuir y el metabolismo microbiano cambia, ambos tratamientos descendieron con ligeras variaciones entre

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

ellos durante esta fase hasta alcanzar valores de pH cercanos a 8.0, esto puede deberse a la formación de ácidos húmicos y fúlvicos durante la estabilización de la materia orgánica H. Liu et al., (2019).

En la fase de maduración, la materia orgánica se estabiliza y reaparecen microorganismos mesófilos. Como se muestra en la Figura 3, el tratamiento TC mantuvo un pH estable alrededor de 8.0 durante esta etapa, sin cambios significativos hasta el final del proceso, los tratamientos no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p=0.508$) sin embargo, el tratamiento TB presentó un aumento progresivo del pH, alcanzando un valor de 8.7. Este incremento de pH se atribuye a la adición de biocarbón gracias a su contenido mineral alcalino. Este comportamiento coincide con los hallazgos de Duan et al., (2019), quien demostró que el biocarbón contribuye a la estabilización y aumento del pH en la fase final del compostaje.

5.1.3. Conductividad Eléctrica (CE)

La Figura 4 muestra la variación de la conductividad eléctrica (CE) en los tratamientos TC y TB durante el compostaje. En la fase mesófila, el tratamiento TC presentó valores iniciales de CE entre 1.3 y 1.9 mS/cm, probablemente debido a la liberación de sales minerales provenientes del estiércol de pollo y la descomposición inicial de la materia orgánica. Este comportamiento es consistente con los hallazgos de Oviedo-Ocaña et al., (2022), quienes señalaron que la mineralización microbiana y la liberación de fosfatos, amonio y potasio contribuyen

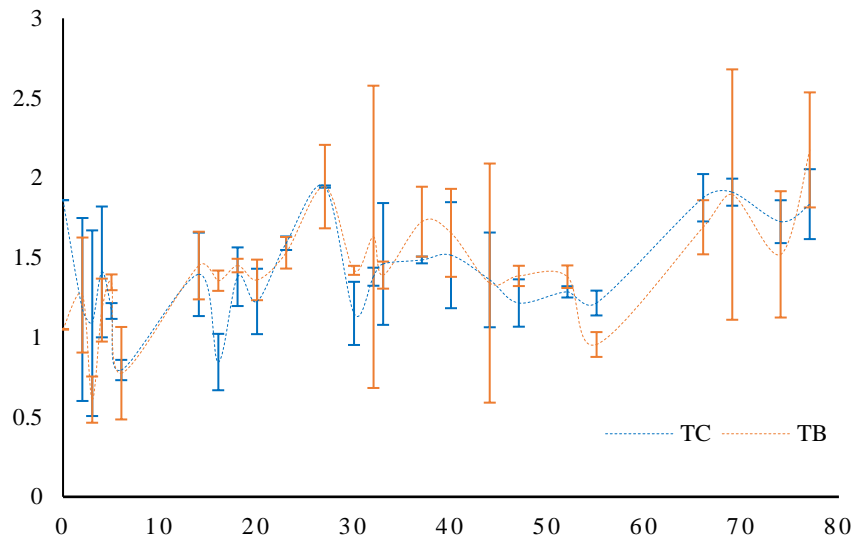
al aumento de la CE. En contraste, el tratamiento TB inició con un valor de CE cercano a 1.0 mS/cm, lo que sugiere que el biocarbón podría haber adsorbido algunas sales en esta fase temprana. Según Parra-Orobio et al., (2023), el biocarbón tiende a estabilizar la CE, ya que retiene

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

y libera gradualmente iones, reduciendo fluctuaciones bruscas y mejorando la estabilidad del compost.

Figura 4

Comportamiento de la CE en los tratamientos TC y TB



Alrededor del día 27 se observó un pico en la CE, indicando una liberación temporal de sales antes de la estabilización. A pesar de que los tratamientos no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p=0.108$), en TB los picos de CE son menos pronunciados en comparación con TC, porque el biocarbón adsorbe y libera gradualmente las sales solubles, evitando aumentos bruscos, además, reduce la lixiviación de iones, manteniendo una liberación más estable de nutrientes, mientras que en TC las sales quedan más expuestas a fluctuaciones Chung et al., (2021).

En la fase de enfriamiento la CE desciende ligeramente en todos los tratamientos, lo cual es normal porque las sales solubles comienzan a lixivarse o inmovilizarse en formas menos solubles, se puede observar una mayor estabilidad, sin fluctuaciones tan pronunciadas, similar a lo

EFFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

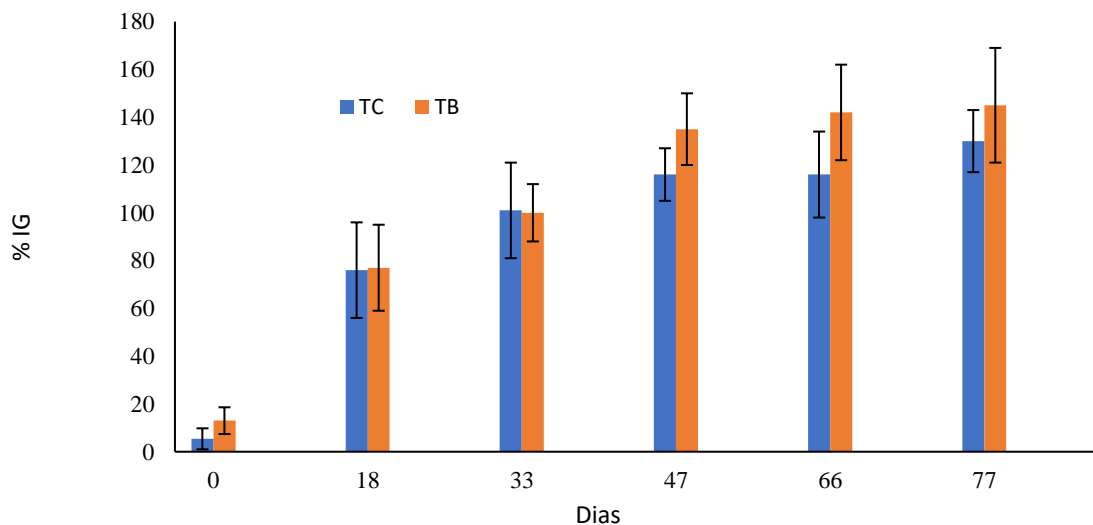
ocurrido en el experimento de Parra-Orobio et al., (2023). En TB se aprecia una reducción más lenta, lo que indica que el biocarbón está liberando algunos de los iones adsorbidos gradualmente.

En la fase final, la CE comienza a aumentar nuevamente. En TB, se observó un valor final de CE mayor que en TC, esto debido a la liberación lenta de sales adsorbidas en el biocarbón, similar a lo ocurrido en Parra-Orobio et al., (2023) donde, en la fase de maduración, los tratamientos con biocarbón mantuvieron valores de CE más elevados, lo que podría mejorar la fertilidad del compost final y su uso agrícola, ya que la CE está relacionada con la concentración de iones solubles esenciales, que son fundamentales para el crecimiento de las plantas. Chung et al., (2021) sugiere que el biocarbón puede regular la disponibilidad de nutrientes en el compost, lo que explicaría la liberación más tardía de sales y la mayor estabilidad en la CE observada en TB.

5.1.4. Índice de Germinación (IG)

La Figura 5

Evolución del índice de germinación (IG) en los tratamientos TC y TB



EFFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

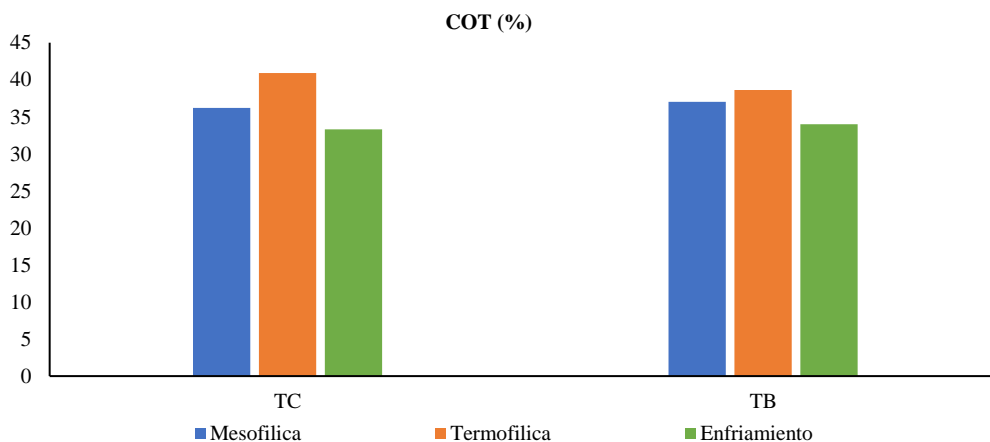
Se evidenció que, en las primeras fases, ambos tratamientos presentaron un comportamiento similar. A lo largo del proceso, el IG mostró un crecimiento continuo hasta estabilizarse en la fase de maduración. Sin embargo, el tratamiento TB alcanzó un IG más alto que TC, con valores de $145\pm 19\%$ y $130\pm 12\%$, respectivamente. Este resultado podría atribuirse a la capacidad del biocarbón para mejorar las propiedades fisicoquímicas del compost, como la retención de humedad, la disponibilidad de nutrientes y la reducción de la fitotoxicidad, creando así un entorno más favorable para la germinación de las semillas. El IG no presentó diferencias significativas ($p=0.696$). Los hallazgos obtenidos coinciden con los reportados en Awasthi et al., (2020) y Zhou et al., (2021) donde se observó que la adición de biocarbón en el compostaje resultó en un aumento significativo del IG.

5.1.5. Contenido de Carbono y Nitrógeno

La Figura 6 muestra la evolución del contenido de carbono orgánico total (COT) y la Figura 7 el contenido de nitrógeno total (NT) en los tratamientos TC y TB durante las fases del compostaje.

Figura 6

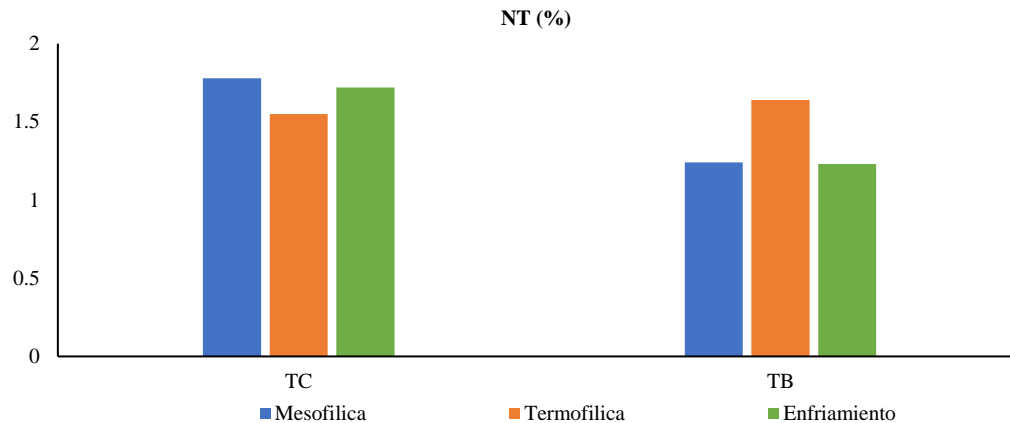
Contenido de carbono en los tratamientos TC y TB



EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

Figura 7

Contenido de nitrógeno de los tratamientos



Durante el proceso de compostaje, el contenido de carbono orgánico total (COT) y el contenido de nitrógeno total (NT) presentó variaciones a lo largo de las distintas fases. En ambos tratamientos, TC y TB, se observó que el Carbono Orgánico Total (COT) aumentó durante la fase termofílica, posiblemente porque la materia orgánica más fácil de degradar se descompuso rápidamente, liberando carbono antes de su transformación en formas más estables.

Posteriormente, en la fase de enfriamiento, el COT disminuyó en ambos tratamientos, reflejando la actividad microbiana en la degradación de la materia orgánica. Sin embargo, en TB, la reducción fue menor que en TC, lo que sugiere que el biocarbón, al contener carbono recalcitrante, contribuyó a su retención y redujo la degradación de la fracción más fácilmente biodegradable.

A lo largo del proceso de compostaje, se observaron diferencias en el contenido de nitrógeno total (NT) entre los tratamientos TC y TB, con valores más bajos en TB durante algunas fases. Por otro lado, en la evolución del contenido de nitrógeno total (NT), se observó que, en TC, el contenido de nitrógeno total (NT) disminuyó un 3.37% desde la fase mesofílica hasta la de

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

enfriamiento, mientras que en TB la reducción fue menor, de 0.81%, lo que confirma que ningún tratamiento presentó alguna pérdida significativa de nitrógeno.

Además, al finalizar el proceso, ambos tratamientos alcanzaron un NT del 1.5%, lo que indica que el biocarbón no causó una pérdida neta de nitrógeno si no que su impacto estuvo más relacionado con la dinámica de transformación del nitrógeno que con su reducción total.

Producto final

Con base en la normativa NTC 5167, se compararon los valores obtenidos en esta investigación, evidenciados en la Tabla 3. El porcentaje de humedad superó los valores máximos permitidos por la norma, esto podría deberse a la última adición de agua en los tratamientos antes del final del proceso para favorecer la actividad microbiana y la descomposición final. Aunque el alto contenido de agua en un proceso estabilizado no representa un problema de calidad del producto final, podría afectar el marketing y las ventas si se realiza la comercialización del producto Oviedo-Ocaña et al., (2022). Por otra parte, se observó que el biocarbón en TB contribuyó a un pH ligeramente más alto en la fase final. Un compost maduro y estable suele presentar un pH entre 7 y 8, como se observó en TC. Chung et al., (2021) señalan que un pH entre 7 y 8 es favorable para la actividad microbiana y descomposición eficiente. Duan et al., (2019), mencionan que un pH de 7 a 10 puede afectar la degradación de ácidos grasos volátiles y la comunidad microbiana. En la presente investigación, el compost maduro presentó un pH entre 8.8 ± 0.5 en TB, debido al biocarbón fue ligeramente más alcalino que TC con 8.0 ± 0.3 , estos valores se encuentran dentro del rango aceptable de la norma (4-9). Sin embargo, a pesar de estas observaciones, en este estudio, la adición de biocarbón en el pH ($p=0.243$) y la humedad ($p=0.238$) no fue estadísticamente significativo.

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

En el experimento Oviedo-Ocaña et al., (2022), en el cual no utilizaron biocarbón como enmienda, se informó que la CE fue elevada en el comienzo >2 mS/cm debido a la presencia de estiércol de pollo, y luego disminuyó por lixiviación, lo cual coincide con TC, lo que significaría que sin biocarbón, los nutrientes lixivian más rápidamente. En esta investigación la CE de los productos no tuvo diferencias estadísticamente significativas en los tratamientos ($p=0.373$), se mantuvieron dentro de rangos normales para compost < 3 mS/cm. Chung et al., (2021) indica que un compost con CE < 4.0 mS/cm es favorable para la mayoría de los cultivos comerciales. Estos resultados concuerdan con los reportados por Khan et al., (2016), en donde se reporta que la CE en compost de gallinaza puede variar entre 5.93 y 7.28 mS/m, pero el biocarbón ayuda a reducirla. También es importante enfatizar que el ligero aumento de CE en TB sugiere que el compost mantendría una buena disponibilidad de nutrientes en suelos agrícolas, favoreciendo la fertilidad. Sin embargo, si el compost se destina a suelos sensibles a la salinidad, se sugiere que es importante controlar la CE final para evitar problemas de acumulación de sales.

Los valores de IG no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p=0.686$) y estuvieron por encima de 100% para ambos tratamientos, lo que sugiere que el compost obtenido no presenta efectos fitotóxicos y, por el contrario, puede promover el crecimiento de las plantas. Esto indica que los materiales orgánicos se descompusieron adecuadamente, generando un producto maduro y estable, con una buena disponibilidad de nutrientes esenciales para la germinación de semillas.

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

TC tuvo 25 ± 2 (%) de valor de cenizas, muy similar al resultado de TB de 25 ± 1 (%), no presentando diferencias estadísticamente significativas ($p=0.771$). Este parámetro, representa la fracción inorgánica del compost y es un indicador de calidad del compost final, ya que un valor de cenizas alto puede significar una acumulación de minerales no degradables, en este caso, ambos tratamientos cumplen con la normativa, en la cual se establece un valor máximo de 60 (%). Para el nitrógeno total NT (%), fundamental para la nutrición de las plantas, ambos tratamientos presentan un valor de 1.5 (%) estando dentro del rango aceptable presentado en la normativa, el cual establece un mínimo de 1 (%).

Para el fósforo total (PT %), la normativa NTC 5167 establece un valor mínimo del 1 %. Sin embargo, los ninguno de los tratamientos cumplió con este requisito ya que TC y TB tuvieron valores de 0.9 % y 0.85 %, respectivamente, los cuales se encuentran ligeramente por debajo del umbral establecido. Esto sugiere que el biocarbón evaluado no contribuye de manera significativa al incremento en la disponibilidad de fósforo. En cuanto al carbono total CT (%), ambos tratamientos presentan valores mayores al 15% establecido como el mínimo por la norma, con TC en 38% y TB en 31.8%, que experimentó una degradación más pronunciada en comparación con el otro tratamiento. Este es un indicador de la estabilidad del compost, la mayor degradación del carbono en TB sugiere que el biocarbón pudo haber favorecido la actividad microbiana y mejorado la aireación, promoviendo una mayor descomposición del carbono, esto contribuye a la retención de carbono a largo plazo en el suelo y mejora la estabilidad del compost Khan et al., (2016).

El contenido de potasio total KT (%) en ambos tratamientos superó el 1 % exigido por la normativa, con valores de 2.4 % en TC y 2.3 % en TB, lo que indica que el compost final cumple

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

con los requisitos para su uso agrícola. Finalmente, el parámetro microbiológico de las enterobacterias (UFC/g), que según normativa debe ser menor a 1000 (UFC/g), cumple para TC con 162 (UFC/g) y para TB con 180 (UFC/g). Khan et al., (2016) destacan la importancia del control microbiológico en el compost para asegurar su calidad y minimizar riesgos sanitarios.

Tabla 3

Resultados finales de los parámetros evaluados en cada tratamiento

Parámetro	Unidad	NTC 5167	TC	TB
<i>Fisicoquímicos</i>				
Humedad	(%)	< 25	44 ± 2	38 ± 3
Cenizas	(%)	<60	25 ± 2	25 ± 1
COT	(%)	>15	38	32
pH	-	>4-<9	8.0 ± 0.3	8.8 ± 0.5
Conductividad	(mS/cm)	-	1.8 ± 0.2	2.2 ± 0.3
NT	(%)	>1	1.5	1.5
C/N	-	<25	25	21
PT	(%)	>1	0.9	0.9
KT	(%)	>1	2.4	2.3
IG	(%)	-	133 ± 20	146 ± 18
<i>Microbiológicos</i>				
Enterobacterias	(UFC/g)	<1000	162	180

6. Conclusiones

En el proceso de compostaje de estiércol de pollo y cebolla de rama, la adición de biocarbón tuvo como resultado un aumento en la temperatura máxima durante el proceso, como también valores altos de pH en la fase de maduración, además, ayudó a una degradación más estable de la materia orgánica. Considerando las condiciones ambientales del páramo de Berlín, donde las bajas temperaturas pueden limitar la eficiencia del compostaje, ambos tratamientos alcanzaron temperaturas adecuadas para el proceso. Adicionalmente, factores como el control de la aireación por medio de los volteos realizados durante el proceso pudieron ayudar en el desarrollo de microorganismos termofílicos, esenciales para la generación de calor durante el compostaje.

Con respecto al producto final, aunque no hubo diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en ningún parámetro, el biocarbón ayudó a estabilizar el carbono en el compost, lo que puede favorecer su estabilidad a largo plazo en el suelo, presentó un adecuado contenido de nitrógeno total (1.5%) y carbono total, por encima del 15% exigido por la norma, lo que evidencia su estabilidad y potencial como enmienda orgánica. El uso de biocarbón incrementó la conductividad eléctrica en la fase final del compostaje, lo que podría representar un riesgo en suelos sensibles a la salinidad si no se controla adecuadamente. El fósforo total en ambos tratamientos no alcanzó el mínimo exigido por la normativa NTC 5167, lo que podría afectar la disponibilidad de este nutriente en aplicaciones agrícolas. Ambos tratamientos cumplieron con el requisito microbiológico medido (enterobacterias), de acuerdo con lo establecido en la normativa NTC 5167. Sin embargo, no se evaluaron otros parámetros microbiológicos contemplados en la norma.

EFFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

Los resultados de esta investigación indican que la adición de biocarbón al co-compostaje es una estrategia efectiva para el compostaje en el páramo de Berlín. Esto se debe, principalmente, a que, aunque ambos tratamientos alcanzaron temperaturas satisfactorias en estas condiciones climáticas, lo que permitió un proceso eficiente, el tratamiento con biocarbón facilitó la obtención de picos de temperatura más altos en la fase termofílica, lo que contribuye a una mejor higienización. Además, el compostaje se presenta como una alternativa rápida y económica, utilizando materia prima disponible localmente, como los residuos de cebolla en rama. Esto no solo reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos, sino que también mejora la rentabilidad y optimiza la gestión de estos residuos orgánicos.

El desarrollo de este tipo de propuestas puede, además, fomentar un modelo de desarrollo rural basado en la agroecología, demostrando el potencial de las comunidades para gestionar su territorio de manera sostenible.

7. Recomendaciones

Se recomienda evaluar estrategias que puedan mejorar la disponibilidad de fósforo y regular la conductividad eléctrica, sin comprometer la calidad del compost.

Evaluar otra dosis de biocarbón y realizar más réplicas en estudios posteriores.

Referencias Bibliográficas

- Agyarko-Mintah, E., Cowie, A., Singh, B. P., Joseph, S., Van Zwieten, L., Cowie, A., Harden, S., & Smillie, R. (2017). Biochar increases nitrogen retention and lowers greenhouse gas emissions when added to composting poultry litter. In *Waste Management* (Vol. 61, pp. 138–149). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.027>
- Arellano-P, H., & Rangel-Ch, J. O. (2008). PATRONES EN LA DISTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN EN ÁREAS DE PÁRAMO DE COLOMBIA: HETEROGENEIDAD Y DEPENDENCIA ESPACIAL/Patterns in the distribution of vegetation in paramo areas: heterogeneity and spacial dependence. *Caldasia*, 355–411.
- Awasthi, M. K., Duan, Y., Awasthi, S. K., Liu, T., & Zhang, Z. (2020). Influence of bamboo biochar on mitigating greenhouse gas emissions and nitrogen loss during poultry manure composting. *Bioresource Technology*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122952>
- Belyaeva, O. N., & Haynes, R. J. (2009). Chemical, microbial and physical properties of manufactured soils produced by co-composting municipal green waste with coal fly ash. *Bioresource Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.032> 100(21), 5203–5209.
- Chung, W. J., Chang, S. W., Chaudhary, D. K., Shin, J. Du, Kim, H., Karmegam, N., Govarathanan, M., Chandrasekaran, M., & Ravindran, B. (2021). Effect of biochar amendment on compost quality, gaseous emissions and pathogen reduction during in-vessel composting of chicken manure. *Chemosphere*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131129>

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

- Cui, E., Wu, Y., Zuo, Y., & Chen, H. (2016). Effect of different biochars on antibiotic resistance genes and bacterial community during chicken manure composting. *Bioresource Technology*, 203, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.030>
- Dang, R., Cai, Y., Li, J., Kong, Y., Jiang, T., Chang, J., Yao, S., Yuan, J., Li, G., & Wang, G. (2024). Biochar reduces gaseous emissions during poultry manure composting: Evidence from the evolution of associated functional genes. *Journal of Cleaner Production*, 452. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142060>
- Delgado, O., & Zarate, E. (2002). Los páramos de Azuay y Cañar. *UNIVERSIDAD-VERDAD*, 197.
- Domínguez, I., Oviedo-Ocaña, E. R., Hurtado, K., Barón, A., & Hall, R. P. (2019). Assessing sustainability in rural water supply systems in developing countries using a novel tool based on multi-criteria analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 11(19). <https://doi.org/10.3390/su11195363>
- Drózdź, D., Wystalska, K., Malińska, K., Grosser, A., Grobelak, A., & Kacprzak, M. (2020). Management of poultry manure in Poland – Current state and future perspectives. *Journal of Environmental Management*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110327>
- Duan, Y., Awasthi, S. K., Liu, T., Zhang, Z., & Awasthi, M. K. (2019). Response of bamboo biochar amendment on volatile fatty acids accumulation reduction and humification during chicken manure composting. *Bioresource Technology*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121845>
- Evans, A. E. V, Mateo-Sagasta, J., Qadir, M., Boelee, E., & Ippolito, A. (2019). Agricultural water pollution: key knowledge gaps and research needs. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 36, 20–27.

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

- Gutiérrez-Salazar, P., & Medrano-Vizcaíno, P. (2019). The effects of climate change on decomposition processes in Andean Paramo ecosystem-synthesis, a systematic review. In *Applied Ecology and Environmental Research* (Vol. 17, Issue 2, pp. 4957–4970). Corvinus University of Budapest. https://doi.org/10.15666/aeer/1702_49574970
- Hemidat, S., Jaar, M., Nassour, A., & Nelles, M. (2018). Monitoring of Composting Process Parameters: A Case Study in Jordan. *Waste and Biomass Valorization*, 9(12), 2257–2274. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0197-x>
- Khan, N., Clark, I., Sánchez-Monedero, M. A., Shea, S., Meier, S., Qi, F., Kookana, R. S., & Bolan, N. (2016). Physical and chemical properties of biochars co-composted with biowastes and incubated with a chicken litter compost. *Chemosphere*, 142, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.05.065>
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812–1836.
- Liu, H., Wang, L., & Lei, M. (2019). Positive impact of biochar amendment on thermal balance during swine manure composting at relatively low ambient temperature. *Bioresource Technology*, 273, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.033>
- Liu, N., Zhou, J., Han, L., Ma, S., Sun, X., & Huang, G. (2017). Role and multi-scale characterization of bamboo biochar during poultry manure aerobic composting. *Bioresource Technology*, 241, 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.144>
- Li, Y., Ma, J., Yong, X., Luo, L., Wong, J. W. C., Zhang, Y., Wu, H., & Zhou, J. (2022). Effect of biochar combined with a biotrickling filter on deodorization, nitrogen retention, and microbial community succession during chicken manure composting. *Bioresource Technology*, 343. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126137>

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

- Meena, A. L., Karwal, M., Dutta, D., & Mishra, R. P. (2021). Composting: Phases and Factors Responsible for Efficient and Improved Composting. *Agriculture and Food E Newsletter*, (January), 85–90. <https://www.researchgate.net/publication/348098151>. Retrieved from
- Oviedo-Ocaña, E. R., Hernández-Gómez, A., Dominguez, I., Alexis Parra-Orobio, B., Soto-Paz, J., & Sánchez, A. (2022). Evaluation of Co-Composting as an Alternative for the Use of Agricultural Waste of Spring Onions, Chicken Manure and Bio-Waste Produced in Moorland Ecosystems. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(14). <https://doi.org/10.3390/su14148720>
- Parra-Orobio, B. A., Soto-Paz, J., Hernández-Cruz, J. A., Gómez-Herreño, M. C., Domínguez-Rivera, I. C., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2023). Evaluation of Biochar as an Additive in the Co-Composting of Green Waste and Food Waste. *Sustainability*, *15*(9), 7437.
- Rangel, J. (2000). *Colombia diversidad biótica III: La región de vida paramuna*.
- Sayara, T., Basheer-Salimia, R., Hawamde, F., & Sánchez, A. (2020, November 1). Recycling of organic wastes through composting: Process performance and compost application in agriculture. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111838> *Agronomy*. MDPI AG.
- Sánchez-Monedero, M. A., Sánchez-García, M., Albuquerque, J. A., & Cayuela, M. L. (2019). Biochar reduces volatile organic compounds generated during chicken manure composting. *Bioresource Technology*, *288*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121584>
- Thies, J. E., & Rillig, M. C. (2012). Characteristics of biochar: biological properties. In *Biochar for environmental management* (pp. 117–138). Routledge.
- Zhou, Y., Awasthi, S. K., Liu, T., Verma, S., Zhang, Z., Pandey, A., Varjani, S., Li, R., Taherzadeh, M. J., & Awasthi, M. K. (2021). Patterns of heavy metal resistant bacterial community succession influenced by biochar amendment during poultry manure composting. *Journal of Hazardous Materials*, *420*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126562>

EFECTO DEL BIOCARBÓN EN EL CO-COMPOSTAJE DE ESTIÉRCOL DE POLLO

Zia, H., Harris, N. R., Merrett, G. V, Rivers, M., & Coles, N. (2013). The impact of agricultural activities on water quality: A case for collaborative catchment-scale management using integrated wireless sensor networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, *96*, 126–138.