

Efecto de la Adición del Biochar sobre las Condiciones del Proceso del Co-compostaje de
Residuos Verdes y Residuos de Alimentos

Jhon Alexander Hernandez Cruz y Martha Cecilia Gómez Herreño

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero(a) Civil

Director:

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Ing. Sanitario, MSc, PhD

Codirectores:

Brayan Alexis Parra Orobio

Ing. Sanitario, MSc, PhD

Jonathan Soto Paz

Ing. Sanitario y Ambiental, PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

Agradecimientos

Los autores deseamos expresar nuestro sincero agradecimiento a los ingenieros Brayán Alexis Parra Orobio, Jonathan Soto Paz y Edgar Ricardo Oviedo Ocaña por su invaluable orientación, apoyo y conocimientos brindados durante todo el proceso de desarrollo de este proyecto de investigación. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para el logro de nuestros objetivos.

También queremos extender nuestros agradecimientos a la Universidad Industrial de Santander (UIS) por brindarnos la oportunidad de realizar esta investigación y por su constante apoyo. Agradecemos especialmente al cuerpo docente de nuestra institución cuya guía y enseñanza han sido fundamentales en nuestra formación profesional.

Además, deseamos reconocer y agradecer al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH-UIS) por su valiosa contribución y por proporcionarnos un entorno colaborativo y enriquecedor para llevar a cabo este proceso.

Sin su apoyo, dedicación y conocimientos, este proyecto no hubiera sido posible.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	15
1.1. Objetivo General	15
1.2. Objetivos Específicos.....	15
2. Marco teórico	16
2.1. Residuos sólidos urbanos (RSU)	16
2.2. Residuos verdes (RV)	16
2.3. Residuos de alimentos (RA)	16
2.4. Compostaje	16
2.5. Compostaje en dos etapas	17
2.6. Compostaje de residuos verdes	17
2.7. Agentes participantes en el proceso de compostaje	17
2.8. Etapas del proceso de compostaje.....	19
2.9. Parámetros operativos y de calidad.....	21
2.10. Biochar	23
3. Metodología	23
3.1. Fase I: Efecto de la incorporación del biochar sobre la eficiencia del proceso de co- compostaje de residuos verdes y de alimentos.	24
3.1.1. Caracterización del sustrato y aditivos.	24
3.1.2. Montaje experimental.	25
3.1.3. Monitoreo del proceso.	28

3.1.4.	Eficiencia del biochar sobre el proceso.	29
3.2.	Fase II: Influencia del biochar sobre los parámetros de calidad del producto final en el co-compostaje de residuos verdes y de alimentos	29
3.2.1.	Eficiencia del biochar sobre el proceso.	29
3.2.2.	Análisis estadístico.....	30
4.	Resultados y discusión.....	30
4.1.	Efecto de la incorporación del biochar sobre la eficiencia del proceso del co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos.	30
4.1.1.	Humedad.	30
4.1.2.	Temperatura.	32
4.1.3.	pH.....	35
4.1.4.	Conductividad eléctrica (CE).....	37
4.1.5.	Carbono orgánico total (COT).....	39
4.1.6.	Nitrógeno total (NT).....	41
4.1.7.	Relación C/N.....	43
4.1.8.	Índice de germinación (IG).....	45
4.2.	Influencia del biochar sobre los parámetros de calidad del producto final en el co-compostaje de residuos verdes y de alimentos.	48
5.	Conclusiones.....	51
6.	Recomendaciones	52
	Referencias Bibliográficas	53

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Composición de los sustratos, aditivos y biochar en cada unidad experimental.	27
Tabla 2. Resumen del proceso de co-compostaje.	30
Tabla 3. Calidad del producto final de cada tratamiento.	50

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Variación de la temperatura, oxígeno y pH durante el proceso de compostaje.</i>	21
Figura 2. <i>Detalle vista frontal de la unidad experimental utilizada en el proceso de co-compostaje.</i>	26
Figura 3. <i>Montaje experimental para el proceso de co-compostaje.</i>	27
Figura 4. <i>Evolución de la humedad de los tratamientos evaluados.</i>	31
Figura 5. <i>Comportamiento de la temperatura de los tratamientos evaluados.</i>	33
Figura 6. <i>Evolución del pH de los tratamientos evaluados.</i>	36
Figura 7. <i>Evolución de la CE de los tratamientos evaluados.</i>	38
Figura 8. <i>Evolución del COT de los tratamientos evaluados. F.I.: Fase inicial, F.T.: Fase termofílica, F.E.: Fase enfriamiento.</i>	40
Figura 9. <i>Evolución del NT de los tratamientos evaluados. F.I.: Fase inicial, F.T.: Fase termofílica, F.E.: Fase enfriamiento.</i>	42
Figura 10. <i>Evolución de la relación C/N de los tratamientos evaluados. F.I.: Fase inicial, F.T.: Fase termofílica, F.E.: Fase enfriamiento.</i>	43
Figura 11. <i>Resultado prueba de germinación del producto final.</i>	46
Figura 12. <i>Evolución de la germinación de los tratamientos evaluados.</i>	46

Resumen

Título: Efecto de la adición del biochar sobre las condiciones del proceso del co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos*

Autor: Jhon Alexander Hernandez Cruz y Martha Cecilia Gómez Herreño**

Palabras Clave: biochar, calidad del producto, co-compostaje, residuos de alimentos, residuos verdes.

Descripción:

Los residuos verdes (RV) y los residuos de alimentos (RA) representan más del 50% de los residuos sólidos urbanos (RSU) y su gestión es un gran desafío debido a la predominancia de compuestos de lignocelulosa. El compostaje se ha utilizado como una alternativa para su transformación y valorización, pero el tiempo de procesamiento es largo y el producto final puede no cumplir con los estándares de calidad. Para superar estos problemas, se han empleado estrategias operativas como el uso de cosustratos, aditivos e inóculos, pero todavía existen desafíos respecto a la reducción de las pérdidas de nitrógeno y el aumento de las tasas de degradación. El biochar (Bch) es un aditivo con potencial para la degradación de RV debido a su porosidad, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y capacidad de absorción, lo que favorece la retención de nutrientes y mejora la estructura del sustrato de compostaje. En este estudio se evaluó el impacto de la adición de Bch sobre el proceso y calidad del producto del co-compostaje de RV y RA, utilizando una mezcla de co-compostaje previamente estudiada de RA crudos (RA*), RA

* 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. Jonathan Soto Paz. Ing. Sanitario y Ambiental, PhD.

procesados (RA**), Aserrín (As), y roca fosfórica (RF). El aserrín se añadió con el propósito de proporcionar soporte, porosidad y estructura al compostaje. Su alta porosidad y capacidad de intercambio catiónico (CIC) lo convierte en un material propicio para mejorar la aireación y la absorción de nutrientes durante el proceso de compostaje. Por otro lado, la roca fosfórica se utilizó como enmienda debido a su aporte de fósforo y su capacidad para reducir la volatilización del nitrógeno. Estas características han sido recomendadas en estudios previos para mejorar la calidad del compost y optimizar el proceso de degradación de los residuos. Se estudiaron cuatro tratamientos (T) por duplicado a escala piloto: T1: 100 %RV, T2: 50%RV+ 32.5% RA* + 2.5% RA**+ 13% As + 2% RF, T3: 48% RV+ 32.5% RA* + 2.5% RA**+ 13% As + 2% RF + 2% Bch, T4: 45% RV+ 32.5% RA* + 2.5% RA**+ 13% As + 2% RF + 5% Bch. Los resultados mostraron que los tratamientos con Bch mantuvieron las temperaturas del rango termofílico por más tiempo (6 días) que los otros tratamientos (3-4 días) y no se presentaron diferencias significativas ($p>0.05$) en los parámetros de pH, humedad y conductividad eléctrica en comparación con los tratamientos de control. La adición de Bch al 2% permitió alcanzar el mayor índice de germinación (137.08%) en el producto final, lo que sugiere un potencial uso agrícola de acuerdo con los parámetros pH, carbono orgánico total (COT), nitrógeno total (NT), conductividad eléctrica (CE), índice de germinación (IG), relación C/N y prueba de autocalentamiento.

Abstract

Title: Effect of the addition of biochar on the conditions of the co-composting process of the green waste and food waste*

Author(s): Jhon Alexander Hernandez Cruz y Martha Cecilia Gómez Herreño**

Key Words: biochar, co-composting, food waste, green waste, product quality.

Description:

Green waste (GW) and food waste (FW) represent more than 50% of urban solid waste (USW) and their management is a major challenge due to the predominance of lignocellulosic compounds. Composting has been used as an alternative for their transformation and valorization, but processing time is long and the final product may not meet quality standards. To overcome these problems, operational strategies such as the use of co-substrates, additives, and inoculants have been employed, but there are still challenges regarding the reduction of nitrogen losses and the increase in degradation rates. Biochar (Bch) is an additive with potential for GW degradation, owing to its porosity, cation exchange capacity (CEC), and absorption ability, which promote nutrient retention and enhance composting substrate structure. This study evaluated the impact of Bch addition on the process and product quality of GW and FW co-composting, utilizing a previously studied co-composting mixture of raw FW (FW*), processed FW (FW**), sawdust (SD), and rock phosphate (RP). Sawdust was added to provide support, porosity, and structure to the composting process. Its high porosity and CEC make it an ideal material for improving aeration

* Degree Work

** Faculty of Physical-mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Sanitary Engineer, MSc, PhD. Co-directors: Brayan Alexis Parra Orobio. Sanitary Engineer, MSc, PhD. Jonathan Soto Paz. Sanitary and Environmental Engineer, PhD.

and nutrient absorption during composting. On the other hand, rock phosphate was used as an amendment due to its phosphorus contribution and ability to reduce nitrogen volatilization. These characteristics have been recommended in previous studies to enhance compost quality and optimize waste degradation. Four treatments (T) were studied in duplicate at pilot scale: T1: 100% GW, T2: 50% GW + 32.5% FW* + 2.5% FW** + 13% Sd + 2% RP, T3: 48% GW + 32.5% FW* + 2.5% FW** + 13% Sd + 2% RP + 2% Bch, T4: 45% GW + 32.5% FW* + 2.5% FW** + 13% Sd + 2% RP + 5% Bch. The results showed that treatments with Bch maintained thermophilic temperature ranges for a longer period (6 days) compared to the other treatments (3-4 days), and no significant differences ($p > 0.05$) were observed in pH, moisture, and electrical conductivity parameters compared to the control treatments. The addition of 2% Bch resulted in the highest germination index (137.08%) in the final product, suggesting its potential agricultural use based on pH, total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), electrical conductivity (EC), germination index (GI), C/N ratio, and self-heating test parameters.

Introducción

Cada año se generan millones de toneladas de residuos en todo el mundo, convirtiendo su gestión en un gran desafío a nivel global. Los residuos sólidos urbanos (RSU) han sido directamente vinculados con impactos ambientales negativos debido a su mal manejo. Los RSU están compuestos en su mayor parte (más del 50%) por los residuos verdes (RV) y los residuos de alimentos (RA) (Gaviria-Cuevas et al., 2019; Hernández-Gómez et al., 2021). Los RV están constituidos por madera y corteza, poda de árboles y arbustos, entre otros (Oviedo-Ocaña et al., 2019).

Los RA y RV son llevados a sitios de disposición final donde se presentan problemas recurrentes asociados al tratamiento de lixiviados, manejo de los gases generados y cobertura diaria del material depositado (Oviedo-Ocaña et al., 2021). En Bucaramanga, se generan aproximadamente 562 t/día de residuos sólidos, que son depositados en el relleno sanitario “El Carrasco” el cual en la actualidad presenta problemas técnicos y ambientales, ya que no cuenta con la capacidad requerida para recibir los residuos producidos, generando problemas ambientales como la contaminación de las fuentes hídricas y los malos olores que afectan la población (Reyes-Torres et al., 2018).

El compostaje es un método efectivo para reducir la masa de los RV y de RA, transformándolos en un producto con nutrientes útiles para las plantas y el suelo (Francou et al., 2008). Sin embargo, el compostaje de RV presenta limitaciones como un mayor tiempo de procesamiento (aproximadamente 112 días) y deficiencias en la calidad del producto. Para mejorar el proceso de compostaje de RV, se han llevado a cabo diferentes estudios con el objetivo de buscar estrategias para mejorar el compostaje, entre las cuales se encuentra la adición de sustratos como

los RA (Oviedo-Ocaña et al., 2019), el uso de aditivos como la roca fosfórica (Hernández-Gómez et al., 2021), la adición de inóculos bacterianos (Ojeda-Barón et al., 2022) y cambios operativos como el compostaje en dos etapas (Oviedo-Ocaña et al., 2021).

Recientemente, diversos estudios han empleado el biochar (Bch) en procesos de compostaje debido a su porosidad, capacidad de intercambio catiónico y capacidad de absorción (Delgado-Arroyo et al., 2019). Los principales beneficios del uso del biochar en el compostaje son el aumento de las tasas de biodegradación y humificación de la materia orgánica, así como la reducción de las pérdidas de nitrógeno y gases de efecto invernadero (GEI). Además, el Bch ayuda a inmovilizar los metales pesados presentes en el suelo, reduciendo así la absorción de metales pesados por parte de las plantas (Chen et al., 2018; Qian et al., 2023; Sánchez-García et al., 2015).

Diversas investigaciones han evaluado el efecto del Bch en el compostaje de residuos orgánicos, encontrando resultados prometedores (Awasthi et al., 2020; Jindo et al., 2012; Lui et al., 2017; Malinowski et al., 2019). Algunos hallazgos importantes son:

- Jindo et al., (2012) analizaron el efecto del Bch en el co-compostaje de estiércol de ganado con residuos de manzana, paja de arroz y salvado de arroz, encontrando una mejora en el proceso de consorcios microbianos y la calidad del producto final en términos de pH y nitrógeno al utilizar una dosis de Bch del 10%.
- Lui et al., (2017) exploraron el efecto del Bch en el compostaje de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, encontrando reducciones en las pérdidas de nitrógeno y fitotoxicidad al utilizar dosis del 1% y 7%.

- Malinowski et al., (2019) investigaron el efecto del Bch en el compostaje de la fracción orgánica de los RSU, encontrando un impacto positivo en parámetros como pH, carbono (C), nitrógeno (N), contenido de humedad, materia orgánica y microbiológicos al utilizar dosis de 1.5%, 3% y 5%. Además, el Bch redujo la toxicidad y retuvo N durante el compostaje.
- Awasthi et al., (2020) estudiaron el efecto del Bch en el compostaje de gallinaza, encontrando beneficios en la reducción de emisiones de nitrógeno de 53.5% a 12.6% al utilizar dosis que oscilan entre el 2% al 10%.

En general, estos estudios muestran que el uso del Bch como aditivo en el compostaje de residuos orgánicos pueden mejorar el proceso de transformación de los residuos en el compost y reducir su impacto ambiental.

Para dar continuidad a los estudios mencionados y a las investigaciones realizadas por el grupo de investigación de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) en el tratamiento de residuos sólidos, donde se ha encontrado evidencia positiva sobre los beneficios de la incorporación de RA, como se demuestra en los estudios de Ojeda-Barón et al., (2022) y Oviedo-Ocaña et al., (2019). Estos estudios revelan que la incorporación de RA no solo contribuye a la sanitización del producto, sino que también mejoraron sus propiedades (Oviedo-Ocaña et al., 2019). Además, se ha observado que el uso de inóculos bacterianos reduce el tiempo de enfriamiento en aproximadamente 4 días, incrementa la degradación de lignocelulosa en un 6.8% y mejora la humificación del producto final (Ojeda-Barón et al., 2022). Estos hallazgos conducen a una reducción significativa en el tiempo del proceso y a una mejora del producto.

La presente investigación evaluó el uso del Bch como aditivo en el co-compostaje de RV, RA, As (aserrín) y RF (roca fosfórica) y su efecto en la calidad del proceso y producto final, para garantizar que el co-compostaje sea eficiente y produzca un compost de calidad. Los resultados obtenidos se compararon con los requisitos establecidos por las normas NTC 5167 y NCh 2880. Este estudio aporta nuevos conocimientos y estrategias efectivas para mejorar el compostaje de materiales de difícil degradación y reducir el impacto ambiental asociado a la gestión de residuos sólidos.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de la adición del biochar sobre el proceso y calidad del producto final del co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos.

1.2. Objetivos Específicos

- Evaluar la incorporación del biochar sobre los parámetros de seguimiento del proceso de co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos.
- Determinar como el biochar afecta el producto final en el co-compostaje de residuos verdes y de alimentos.

2. Marco teórico

2.1. Residuos sólidos urbanos (RSU)

Son materiales que se generan en las zonas urbanas y suburbanas, principalmente en los hogares, comercios, oficinas, instituciones y otros establecimientos. Estos residuos incluyen una amplia variedad de materiales, como papel, cartón, plásticos, restos de alimentos, materia orgánica, textiles y otros objetos que se descartan tras su uso (Mayes-Ramírez et al., 2023).

2.2. Residuos verdes (RV)

Los RV son materiales lignocelulósicos, como podas, hojas secas y ramas, que se producen como resultado de la plantación y mantenimiento de jardines, parques, espacios públicos (caminos) y protección del paisaje (Cardona et al., 2008)].

2.3. Residuos de alimentos (RA)

Los RA son todos aquellos alimentos que no fueron consumidos y son descartados por quien los genera. Estos se pueden clasificar en procesados y sin procesar, siendo los procesados aquellos que pasan por una serie de operaciones de cocción; por otro lado, los alimentos no procesados se definen como partes de plantas (semillas, hojas, raíces, frutas, cascaras) o animales (carne, leche) (Cardona et al., 2008).

2.4. Compostaje

El compostaje es un proceso que implica la descomposición biológica aeróbica de la materia orgánica y su estabilización por parte de microorganismos. El material después del proceso de degradación dependiendo de sus características fisicoquímicas y biológicas es conocido como compost y puede ser aplicado al suelo de forma beneficiosa (Sánchez-Díaz et al., 2009).

2.5. Compostaje en dos etapas

Para biomásas con alto contenido de lignocelulosa se ha determinado que el compost tradicional conlleva mucho tiempo, produciendo gases olorosos (es decir, NH_3 y H_2S), y genera un producto no apto para uso comercial. Con base en esto, algunos investigadores han descrito una innovadora tecnología de compostaje de dos etapas que incluye un compostaje primario y un compostaje secundario dando lugar a dos picos en la temperatura (55- 60 °C o incluso más) y un período termófilo más largo; generando como consecuencia un mejor producto y en un tiempo más corto que el compostaje tradicional (Oviedo-Ocaña et al., 2021).

2.6. Compostaje de residuos verdes

El compostaje es un método probado para el tratamiento tanto de RV como de residuos de alimentos, considerándose eficaz para reducir la masa de los RV, para desinfectar, y para transformarla en un producto rico en nutrientes útiles para las plantas y del suelo, con el principal reto de descomponer el material lignocelulósico, material integrante de los residuos verdes, ya que por lo general se descompone muy lentamente (Hernández-Gómez et al., 2021).

2.7. Agentes participantes en el proceso de compostaje

- **Aireación y concentración de oxígeno**

Dado que el compostaje es un proceso aeróbico, el nivel de oxígeno recomendado, que puede variar entre el 15 % y el 20 %, debe mantenerse volteándolo para evitar daños en condiciones anaeróbicas que producen menos concentraciones (Ojeda-Barón et al., 2022).

- **Carbono y nitrógeno**

Los microorganismos desempeñan un papel crucial en el proceso de compostaje, y para su crecimiento requieren una fuente de carbono, macronutrientes como el nitrógeno, fósforo y potasio, así como ciertos oligoelementos. El carbono actúa como principal fuente de energía para

los microorganismos, y una parte de esta energía se utiliza en su metabolismo mientras que el resto se libera en forma de calor. El nitrógeno, por otro lado, es esencial para el crecimiento y funcionamiento de las células microbianas, y su disponibilidad juega un papel crucial en el proceso de compostaje. Si el nitrógeno fuera un factor limitante, la descomposición sería lenta. Por otro lado, un exceso de nitrógeno podría resultar en pérdida de este elemento en forma de amoníaco u otros compuestos nitrogenados. La relación carbono-nitrógeno (C:N) es un factor importante que afecta el proceso de compostaje y el resultado final del compost. Estudios previos han sugerido que una relación C:N entre 25 y 40 es óptima, aunque este valor puede variar dependiendo del tipo de sustrato utilizado en el compostaje. Es fundamental mantener un equilibrio adecuado entre la fuente de carbono y la disponibilidad de nitrógeno para asegurar un proceso de compostaje eficiente y obtener un producto final de alta calidad. Una comprensión precisa de la relación C:N y otros factores nutricionales es esencial para optimizar el proceso de compostaje y aprovechar al máximo la acción de los microorganismos para la descomposición de los residuos orgánicos (Ojeda-Barón et al., 2022).

- **Humedad**

El contenido de humedad de la mezcla de compostaje proporciona un medio para el transporte de nutrientes disueltos necesarios para las actividades metabólicas y fisiológicas de los microorganismos, si el contenido de humedad cae por debajo de un nivel crítico, la actividad microbiana disminuirá, produciendo una baja eficiencia de la degradación de la materia orgánica. Un contenido de humedad demasiado alto puede producir una condición anaerobia, causar la lixiviación de los nutrientes, disminuir la tasa de descomposición y generar malos olores (Zurita-Martínez et al., 2015).

- **Microorganismos**

Durante el compostaje, los microorganismos tienen la función de convertir la materia orgánica en dióxido de carbono, biomasa, calor y productos finales similares al humus; esta función depende de su capacidad para generar las enzimas necesarias para degradar los sustratos, que se requieren cuando los sustratos son más difíciles de degradar. Sistema enzimático completo y más amplio. De esta manera, mediante la acción de los microorganismos, los compuestos orgánicos complejos como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina se descomponen en moléculas más pequeñas que pueden ser utilizadas por las células microbianas (Ojeda-Barón et al., 2022).

2.8. Etapas del proceso de compostaje.

Durante el proceso de compostaje, los microorganismos descomponen el carbono (C), el nitrógeno (N) y otras materias orgánicas, lo que genera calor en condiciones óptimas. Este aumento de temperatura, que puede medirse a lo largo del tiempo, nos permite clasificar el proceso en cuatro etapas

- **Mesofílica**

A temperatura ambiente, los microorganismos mesófilos se multiplican rápidamente en la materia orgánica y en cuestión de días, e incluso horas, la temperatura se eleva hasta alcanzar los 45°C. Durante esta primera etapa, se produce la degradación de compuestos solubles como los azúcares, lo cual genera ácidos orgánicos que pueden reducir el pH hasta alcanzar valores cercanos a 4.0 o 4.5. Esta etapa tiene una duración aproximada de dos a ocho días (Oviedo-Ocaña et al., 2021).

- **Termofílica**

Cuando el material compostado alcanza temperaturas superiores a los 45°C, los microorganismos mesófilos son reemplazados por aquellos que prosperan a temperaturas más

altas, principalmente bacterias termófilas. Estos microorganismos facilitan la descomposición de compuestos de carbono más complejos, como la celulosa y la lignina. Durante la etapa termofílica del compostaje, la temperatura oscila entre 65°C y 70°C y se alcanza en un período de 24 a 72 horas. Esta fase puede durar días o meses, dependiendo de las características del material de partida, el tamaño de las pilas, las condiciones del entorno y las condiciones ambientales. También se conoce como fase activa debido a la rápida descomposición del material. Además, en esta etapa se lleva a cabo la higienización del compost, ya que las altas temperaturas ayudan a eliminar patógenos y semillas de malezas (Oviedo-Ocaña et al., 2021).

- **Enfriamiento**

En esta fase, la temperatura desciende por debajo de los 40°C, lo que resulta en una reducción de la actividad microbiana debido a la disminución de las fuentes de carbono en el material compostado. Durante este período, los microorganismos mesófilos reinician su actividad y se encargan de degradar los azúcares restantes, así como la celulosa y la hemicelulosa, a lo largo de varias semanas (Oviedo-Ocaña et al., 2021).

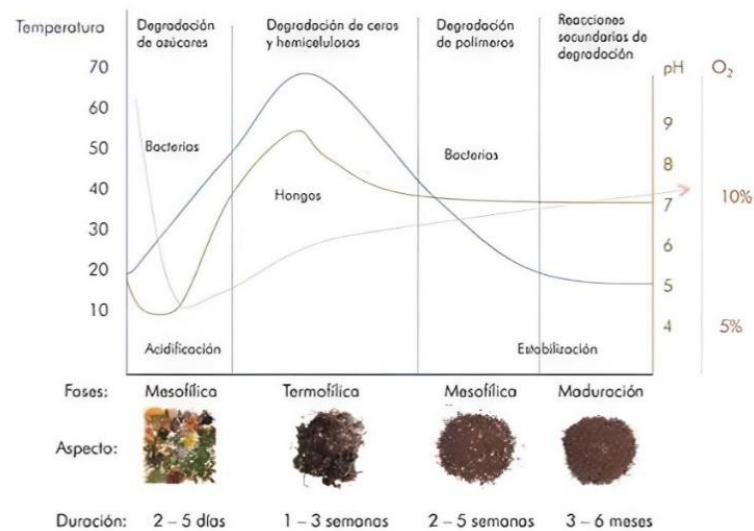
- **Maduración**

En esta última fase, los residuos orgánicos siguen descomponiéndose y se transforman en sustancias húmicas biológicamente estables. Durante este periodo, los ácidos orgánicos potencialmente tóxicos también se estabilizan. Esta etapa puede tener una duración de 1 a 12 meses a temperatura ambiente, con el objetivo de asegurar la obtención de un compost de calidad con una temperatura y pH estables. De esta manera, se garantiza que el compost no represente ninguna amenaza para las plantas ni para el suelo al momento de ser aplicado (Oviedo-Ocaña et al., 2021).

En la figura 1 se presentan las fases del proceso de compostaje en el tiempo en función de la temperatura, oxígeno y pH.

Figura 1.

Variación de la temperatura, oxígeno y pH durante el proceso de compostaje.



Nota: El gráfico representa la evolución de las etapas del proceso de compostaje a lo largo del tiempo. Tomado de Zurita-Martínez et al. (2015).

2.9. Parámetros operativos y de calidad

- **Concentración de oxígeno**

La mayor tasa de consumo de oxígeno se presenta en la fase termofílica donde se busca mantener un nivel de saturación del 10%, sin descender del 5% para la optimización del tiempo en el proceso (Zurita-Martínez et al., 2015).

- **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica (CE) mide la concentración de sales solubles presentes en el producto final y la presencia de iones de amonio o nitrato formados durante el proceso (Bueno-Márquez et al., 2008).

- **Humedad**

Para una máxima eficiencia en el proceso de degradación esta se debe mantener entre el 45% y el 60%, si este porcentaje es menor disminuye la actividad microbiana y en caso de un exceso se interferirá la oxigenación del material (Zurita-Martínez et al., 2015).

- **Índice de germinación**

Los valores de índice de germinación por debajo de 50% indican una alta fitotoxicidad del material, entre el 50% y el 80% una fitotoxicidad moderada, finalmente cuando los valores superan el 80% se considera que el material no presenta fitotoxicidad (Iglesias et al., 2008).

- **pH**

El pH recomendado para realizar el proceso de compostaje de manera óptima está en un rango de 6,5 y 8 (Marín-Bahamón et al., 2019).

- **Prueba de auto calentamiento**

El aumento de la temperatura presentado en el material respecto a la temperatura de incubación permite la cuantificación de la estabilización de la materia orgánica (Cardona et al., 2008).

- **Tamaño de partícula**

El tamaño ideal de los materiales para iniciar el proceso de compostaje esta entre los 5 a 20 cm (Zurita-Martínez et al., 2015).

- **Temperatura**

La temperatura no debe decaer por debajo de los 20°C interrumpiendo con la actividad microbiana, ni superar los 65°C, ya que algunos de los microorganismos podrían morir o inhibirse (Zurita-Martínez et al., 2015).

- **Sólidos volátiles**

Son los compuestos que se pierden en el proceso de calcinación del material del proceso de compostaje, es decir a una temperatura de 550°C (Marín-Bahamón et al., 2019).

2.10. Biochar

El "Biochar" o "biocarbón" es un valioso producto que se obtiene mediante la carbonización de biomasa y residuos biodegradables a través de un proceso llamado pirólisis. Se caracteriza por tener un alto contenido de carbono orgánico y una notable resistencia a la degradación. Se produce mediante la aplicación controlada de calor a la biomasa, como residuos agrícolas, madera o residuos de cultivos. Durante este proceso, se produce una descomposición térmica de la materia orgánica, lo que da como resultado la formación del biochar. Una de las principales características del biochar es su alto contenido de carbono, lo que lo convierte en un producto con potencial para el secuestro de carbono. Además, tiene una estructura porosa que le confiere una gran capacidad de retención de agua y nutrientes, lo que lo convierte en un excelente mejorador de suelos (Lou et al., 2015; Soil Health et al., 2023).

3. Metodología

Este estudio se llevó a cabo en el campus de la Universidad Industrial de Santander (UIS), Colombia, mediante el montaje a escala piloto de unidades de compostaje de RV y RA con biochar.

El proyecto se desarrolló en dos fases:

- I) Efecto de la incorporación del biochar sobre la eficiencia del proceso del co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos.
- II) Influencia del biochar sobre los parámetros de calidad del producto final en el co-compostaje de residuos verdes y de alimentos.

3.1. Fase I: Efecto de la incorporación del biochar sobre la eficiencia del proceso de co-compostaje de residuos verdes y de alimentos.

En la primera fase de este estudio, se examina el impacto del Bch en la eficiencia del co-compostaje de RV y RA. Se utilizan diferentes tipos de residuos, incluyendo RV, RA crudos y RA procesados, en combinación con aditivos como aserrín y roca fosfórica. Se lleva a cabo un montaje experimental utilizando reactores con cuatro tratamientos distintos. Durante el proceso se realiza un monitoreo continuo de parámetros importantes como temperatura, pH, humedad y carbono orgánico. La eficiencia del Bch se evaluó considerando factores como el tiempo de compostaje, la duración de las fases del proceso y la temperatura máxima alcanzada.

3.1.1. Caracterización del sustrato y aditivos.

Los sustratos utilizados en la unidad experimental en el proceso de co-compostaje fueron RV y RA (crudos y procesados). Los RV fueron el sustrato principal, estos procedieron de las actividades de corte y césped que se realizan en la UIS, campus principal. Los RV estuvieron constituidos por hojas (35.1%), recortes de hierbas (26.5%), extracto de suelo (20.5%), frutos (3.2%), raíces (8.6%), raíces (0.3%), material sobrante (0.2) entre otros (5.6%) (Soto-Paz et al., 2022).

Por otra parte, los RA se obtuvieron de la sección de comedores del servicio de bienestar universitario. Los RA crudos estuvieron constituidos por cebolla (17.5%), papa (16.7%), cascaras de fruta (33.7%), zanahoria (1.6%), lechuga (17.9%), plátano (4.5%) y yuca (8.1%) (Soto-Paz et al., 2022). Los RA procesados correspondieron al 2.5% de la masa total y estuvieron conformados por las sobras de los almuerzos entregados diariamente (Soto-Paz et al., 2022).

En algunos tratamientos (T2, T3y T4), se incluyeron aditivos adicionales para mejorar el proceso de compostaje. Uno de estos aditivos fue el aserrín (As), que se agregó en una proporción del 13% con el propósito de proporcionar estructura, porosidad y soporte al compost. Esta adición de As contribuye a mejorar la circulación del aire y la retención de agua en el compost, favoreciendo así la actividad microbiana y la descomposición de los materiales orgánicos. Otro aditivo utilizado fue la roca fosfórica (RF), que se incorporó en un 2% como enmienda. La roca fosfórica es una fuente de fósforo, un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas. Su inclusión en el compostaje ayuda a enriquecer el material con fósforo, promoviendo así un mejor desarrollo de las plantas cuando se utilice el compost como fertilizante. Además, la presencia de roca fosfórica contribuye a reducir la volatilización del nitrógeno, lo que mejora la eficiencia del compostaje, tal como se ha recomendado en investigaciones previas (Oviedo-Ocaña et al., 2022).

También se utilizó Bch de tipo comercial, el cual se obtiene a partir de residuos de poda, jardín y del sector agrícola. Para su producción, el Bch fue sometido a un proceso de pirolisis a una temperatura de 650°C durante 2 horas en un horno tubular. Durante este proceso, se creó un ambiente libre de oxígeno utilizando nitrógeno de alta pureza (99.9%). Esta condición de ausencia de oxígeno durante la producción del Bch garantiza la formación de un producto de calidad con propiedades absorbentes y una alta porosidad, que contribuyen a mejorar la retención de nutrientes hidrosolubles y la estructura del compost (Zurita-Martínez et al., 2015).

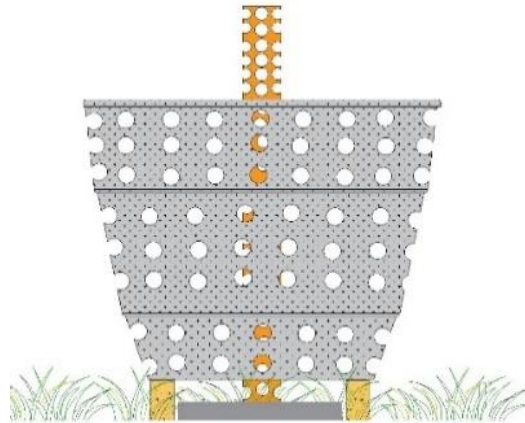
3.1.2. Montaje experimental.

Se realizó un montaje a escala piloto en reactores de 250 L con capacidad de tratar 40 kg de residuos. Los reactores fueron acondicionados para garantizar aireación pasiva como lo propone Rawoteea et al., (2017) como se presenta en las Figuras 2. y 3. Además, fueron cubiertos con una

chaqueta aislante térmica para evitar la pérdida de calor durante el proceso de degradación de los sustratos.

Figura 2.

Detalle vista frontal de la unidad experimental utilizada en el proceso de co-compostaje.

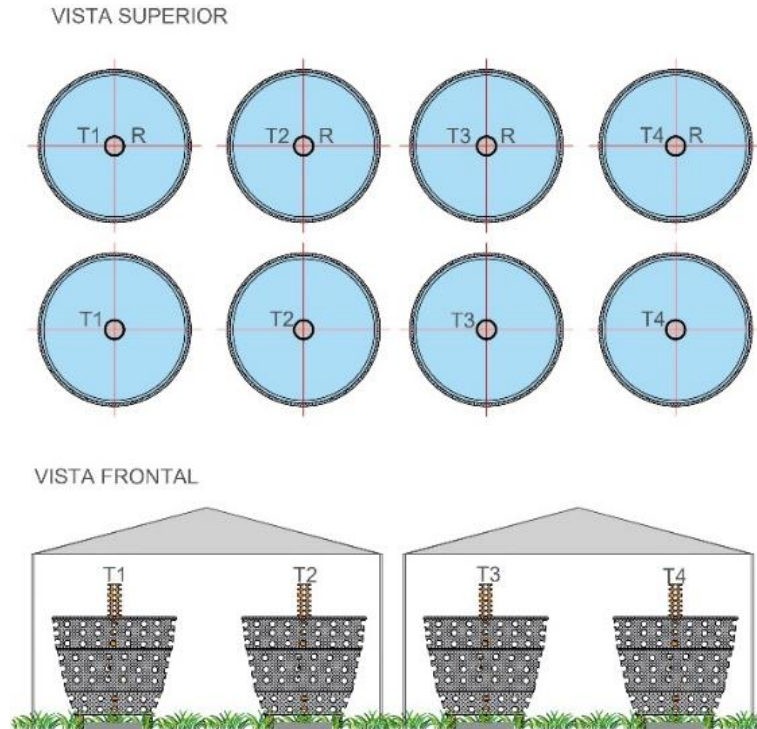


Fuente: [Parra-Orobio et al. (2023)].

Se establecieron un total de cuatro tratamientos (T) experimentales: i) T1: RV, ii) T2: RA+RV+AS+RF, iii) T3: RA+RV+AS+RF+Bch (dosis al 2%), iv) T4: RA+RV+AS+RF+Bch (dosis al 5%), Cada tratamiento contó con un duplicado (R). La composición de cada uno de los sustratos y aditivos usados en los tratamientos se realizó en términos de masa y porcentajes definidos basándose en el artículo publicado por Oviedo-Ocaña et al., (2019) como se presentan en la Tabla 1.

Figura 3.

Montaje experimental para el proceso de co-compostaje.



Fuente: (Parra-Orobio et al., 2023).

Tabla 1.

Composición de los sustratos, aditivos y biochar en cada unidad experimental.

Reactor	Mezcla	Masa (kg)
T1	100 %RV	40
T2	50%RV+ 32.5% RA* + 2.5% RA**+ 13% As + 2% RF	20 RV+ 13 RA* + 1 RA**+ 5.2 As +0.8 RF
T3	48% RV+ 32.5% RA* + 2.5% RA**+ 13% As + 2% RF + 2% Bch	19.2 RV+ 13 RA*+1 RA**+ 5.2 As +0.8 RF+ 0.8 Bch
T4	45% RV+ 32.5% RA* + 2.5% RA**+ 13% As + 2% RF + 5% Bch	18 RV+ 13 RA*+1 RA**+ 5.2 As +0.8 RF+ 2 Bch

Notas: T: Tratamiento, RV: Residuos verdes, RA*: Residuos de alimentos crudos, RA**:
Residuos de alimentos procesados, As: Aserrín, RF: Roca fosfórica, Bch: Biochar. **Fuente:**
(Oviedo-Ocaña et al., 2019).

3.1.3. Monitoreo del proceso.

El monitoreo comenzó después de realizar el montaje experimental (10 de septiembre de 2022). Se recopilaron datos de los cuatro tratamientos y se promedió cada tratamiento con su duplicado para obtener un mejor análisis de los parámetros fisicoquímicos. Cada tres días se recolectó una submuestra de cada uno de los reactores, tomando cuatro puntos periféricos y uno central (Oviedo-Ocaña et al., 2019). El monitoreo de los reactores se detuvo cuando el rango de temperatura se encontraba entre 24 ± 2 °C (temperatura promedio ambiente in situ), exactamente en el día 44 (Ojeda-Barón et al., 2022).

Incrementos de temperatura superiores a 45°C logran una higienización de los tratamientos, además se realizó la prueba de autocalentamiento al finalizar el proceso de compostaje para determinar la estabilidad del producto (rangos de estabilidad) mediante la aplicación de cambios térmicos a una muestra aislada en un vaso de Dewar (Analizador de Calidad Del Compost RM-82 Rottegrade Mes System) poniendo en evidencia la actividad biológica presente. Se realizó volteo manual de cada unidad experimental en función de los cambios de temperatura (fase termofílica) y concentración de oxígeno (<10%) y, en las fases de enfriamiento y maduración, para prevenir la compactación y formación de grumos, y homogenizar el material (Ojeda-Barón et al., 2022).

3.1.4. Eficiencia del biochar sobre el proceso.

La eficiencia del proceso se determinó considerando criterios como el tiempo para alcanzar la temperatura del rango termofílica, la duración de la fase termofílica y la temperatura máxima alcanzada. La fase termofílica comienza una vez se superan los 45 °C, temperatura que se mantiene, produciendo una rápida degradación del material añadido al tratamiento, contribuyendo a la higienización de la mezcla (Ojeda-Barón et al., 2022).

La fase de enfriamiento inicia una vez se finaliza la fase termofílica en donde la temperatura desciende hasta temperaturas cercanas a la temperatura ambiente in situ (24 ± 2 °C). Además, se analizaron parámetros como pH, conductividad eléctrica (CE), humedad (W), carbono orgánico total (COT), relación carbono/nitrógeno (C/N) y nitrógeno total (NT) según ICONTEC (2011). Se consideró que el proceso culminó cuando se presenta un bajo consumo de oxígeno (<5%) en los tratamientos por varios días continuos.

3.2. Fase II: Influencia del biochar sobre los parámetros de calidad del producto final en el co-compostaje de residuos verdes y de alimentos

3.2.1. Eficiencia del biochar sobre el proceso.

Una vez concluido el proceso, el material fue tamizado en un tamiz ASTM N°4, donde se tomaron 2 kg del material para caracterizar el producto en términos de humedad (W), conductividad eléctrica (CE), pH, sólidos volátiles, nitrógeno total (NT), carbón orgánico total (COT), relación carbono nitrógeno (C/N), índice de germinación (IG) y prueba de autocalentamiento (PA) para contrastarlos con la normativa colombiana (NTC 5167) y otras referencias internacionales como la norma chilena (Nch 2880).

3.2.2. Análisis estadístico.

Se procesaron los datos mediante el uso de herramientas de estadística descriptiva como promedios y desviaciones, adicionalmente se realizó un análisis de varianza unidireccional con un nivel de significancia de 5% (Montgomery et al., 2004) para determinar si hay incidencia en la incorporación del Bch sobre el proceso y la calidad del producto.

4. Resultados y discusión

4.1. Efecto de la incorporación del biochar sobre la eficiencia del proceso del co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos.

En la Tabla 2 se presenta un consolidado de los tratamientos evaluados en el proceso de co-compostaje.

Tabla 2.

Resumen del proceso de co-compostaje.

Parámetro		T1	T2	T3	T4
Duración fases (días)	Mesofílica	3	1	1	1
	Termofílica	3	4	6	6
	Enfriamiento	38	39	37	37
Temp Max (°C)		44.3	53.2	53.6	52.8
Tiempo para alcanzar Temp Max (días)		6	4	3	3
pH Final		7.71	8.04	7.50	8.12

Notas: T: Tratamiento, Temp: Temperatura. *Fuente:* Elaboración propia.

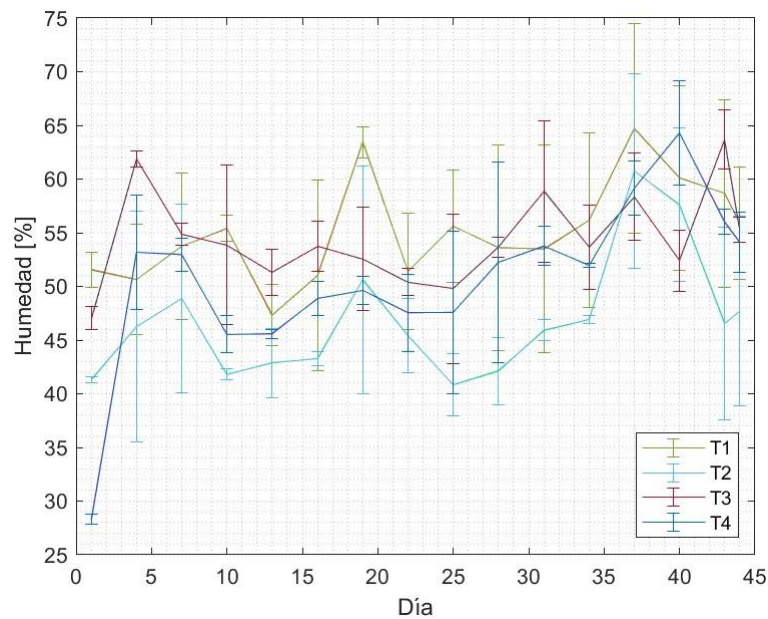
4.1.1. Humedad.

La humedad es un factor crucial en el proceso de compostaje, ya que tienen un impacto directo en el crecimiento y los procesos metabólicos de los microorganismos que degradan los residuos orgánicos. Mantener niveles óptimos de humedad, en un rango de 35% a 60%, resulta

crucial para garantizar una actividad biológica eficiente. Cuando la humedad es insuficiente (<35%), se requiere la adición de agua para estimular la actividad microbiana. Por otro lado, niveles de humedad superiores al 60% pueden indicar problemas de aireación, lo que conlleva a una fermentación anaeróbica indeseable, generando olores desagradables y emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, la humedad por debajo del 30% reduce significativamente la actividad microbiana, lo cual afecta negativamente la eficiencia del proceso del compostaje y puede resultar en un producto final biológicamente inestable (Paz-González et al., 2008). Los resultados obtenidos en relación con la humedad se presentan en la Figura 4.

Figura 4.

Evolución de la humedad de los tratamientos evaluados.



Fuente: Elaboración propia.

Durante todo el proceso, se observó que todos los tratamientos mantenían niveles de humedad superiores al valor mínimo recomendado (>35%) por Torres-Lozada et al., (2020) y Reyes-Torres et al., (2018) para mantener la actividad biológica óptima. Para mantener un

adecuado control de la humedad, se realizaron ajustes periódicos añadiendo agua de acuerdo con las necesidades de cada tratamiento.

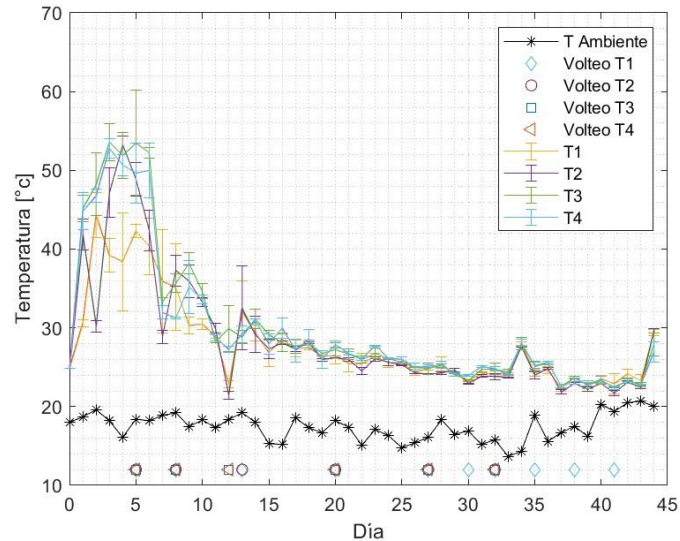
Durante el proceso, se realizó un riego mayor en el tratamiento T1, con la adición de 10 L de agua, mientras que los tratamientos T2, T3 y T4 requirieron adiciones de 2 L, 0.7 L y 1.4 L respectivamente para mantenerse dentro del rango de humedad requerido. La incorporación de Bch en los tratamientos demostró tener un efecto positivo en la retención de nutrientes solubles en agua en la mezcla (Brunet-Zulueta et al., 2020), debido a las propiedades altamente porosas, gran área superficial y capacidad de absorción del Bch. Específicamente, la adición de un 2% de Bch resultó en una mayor retención de humedad en comparación con los otros tres tratamientos. Estos resultados son consistentes con los hallazgos reportados por Malinowski et al., (2019).

4.1.2. Temperatura.

La temperatura determina la tasa de degradación de la materia orgánica del proceso de compostaje, afectando los niveles de actividad microbiana y la eficiencia del proceso (Brinton et al., 1996). La Figura 5 visualiza el comportamiento térmico durante el proceso y los momentos en que se realizaron volteos. El volteo influye en la fluctuación térmica, puesto que permiten la aireación y redistribución del material de la mezcla, mejorando la degradación de la materia orgánica (Ojeda-Barón et al., 2022).

Figura 5.

Comportamiento de la temperatura de los tratamientos evaluados.



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2 muestra que la fase mesofílica varió dependiendo de la composición de cada uno de los tratamientos, para las pilas del T1 se presenta al tercer día, a diferencia de los tratamientos del T2, T3 y T4 al término del primer día, este comportamiento es similar al que registró Ojeda-Barón et al., (2022) para RV y RA. La fase termofílica alcanza temperaturas máximas de 44.3 °C para T1 y temperaturas cercanas a los 54.0 °C para el resto de los tratamientos mostrando un incremento acelerado debido a la liberación de calor causada por la degradación de materia orgánica por acción microbiana, degradando compuestos simples como azúcares, aminoácidos y proteínas presentes principalmente en los residuos de alimentos que contiene la mezcla (Ojeda-Barón et al., 2022).

Durante la observación de los diferentes tratamientos, se registraron diferentes resultados en cuanto a las temperaturas alcanzadas. En el caso de T1, se observó una temperatura máxima de 44.3 °C que se mantuvieron durante 3 días, alcanzando su punto máximo en el tercer día. Sin embargo, esta temperatura no logró alcanzar la condición termofílica requerida ($T > 45^{\circ}\text{C}$). Esto

podría deberse a la falta de materia orgánica de rápida degradación y a una deficiencia de nitrógeno, lo cual afectara la temperatura óptima para el proceso de compostaje y pueden tener un impacto en la calidad del compost final. Por otro lado, durante los primeros días del proceso en T2, se observaron descensos en la temperatura debido a los daños presentados en las cubiertas causados por el exceso de lluvia. Estos factores externos pueden influir en el desarrollo del proceso de compostaje y afectar los resultados obtenidos.

A pesar de la situación que se produjo en las cubiertas, T2 logró finalmente entrar en el rango termofílico, alcanzando una temperatura máxima de 53.2 °C en el cuarto día, la cual se mantuvo durante 3 días consecutivos. Sin embargo, se observaron diferencias significativas ($p=0.010$) entre los tratamientos a los cuales se les agrego con Bch, en comparación con los que no tienen. Estos tratamientos con Bch alcanzando la fase termofílica de manera más rápida y la mantuvieron durante periodos más prolongados (6 días), como se evidencia en las temperaturas registradas en T3 (53.6 °C) y T4 (52.8 °C). Estos resultados son consistentes con las investigaciones previas de Méndez-Fernández et al., (2017), quienes también encontraron que el uso de Bch mejora la actividad biológica y favorece la obtención de temperaturas más altas en el proceso de compostaje

El comportamiento del T3 y T4 en el rango termofílico se mantuvo durante seis días; por lo tanto, estos tratamientos lograron condiciones de higienización ($T>50^{\circ}\text{C}$ durante tres o más días (Soobhany et al., 2018), este comportamiento es similar a lo planteado por López-Cano et al., (2016) con una proporción de Bch al 4%. Este fenómeno se pudo presentar debido a que el Bch llena los espacios libres entre las partículas de la materia prima compostada evitando la pérdida de calor durante el proceso, además de aumentar la aireación, ya que evita la formación de grumos o la compactación de los residuos. El Bch constituye un hábitat adecuado para la proliferación de

microorganismos y ejerce un efecto positivo sobre las propiedades del sustrato, el área superficial y el contenido de humedad, estos cambios promovieron la actividad microbiana y el aumento de temperatura (Ojeda-Barón et al., 2022).

La fase de enfriamiento y maduración se caracteriza por el crecimiento de una nueva comunidad mesófila que es diferente de la fase mesófila inicial (Ojeda-Barón et al., 2022). En los tratamientos T1 y T2 la fase de enfriamiento se inició el día 18, mientras que en los tratamientos T3 y T4 se inició el día 19, Finalmente, se llega a la etapa de maduración donde las temperaturas descienden paulatinamente hasta alcanzar la temperatura ambiente, y el proceso de compostaje finaliza al día 44.

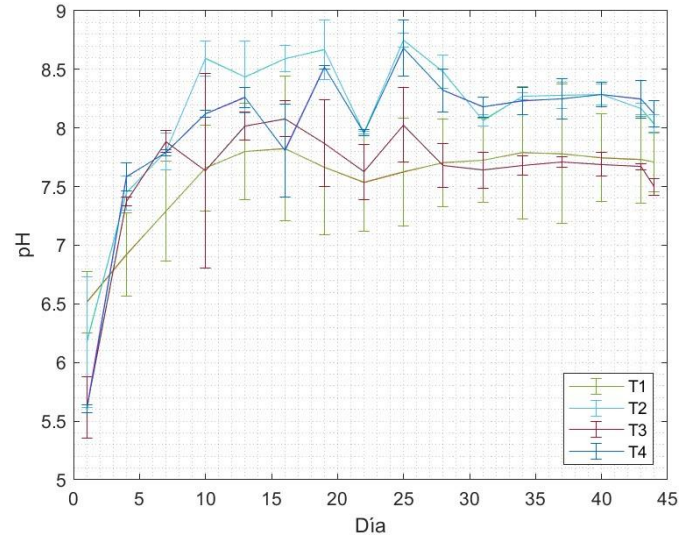
El comportamiento presentado en la fase de enfriamiento y maduración es similar a lo plantado en el estudio realizado por Yao et al., (2019) que evaluó el uso de biochar de bambú como aditivo en el compostaje de residuos de jardín y encontró que la fase de enfriamiento comenzó alrededor del día 20 y que el proceso de compostaje finalizó alrededor del día 45 y por Chen et al., (2018) que evaluó el uso de biochar de paja de arroz como aditivo en el compostaje de residuos de alimentos y encontró que la fase de enfriamiento comenzó alrededor del día 20 y que el proceso de compostaje finalizó alrededor del día 40.

4.1.3. pH.

El pH varió con el tiempo durante el proceso de compostaje y posiblemente presentó una influencia directa debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos (Bueno-Márquez et al., 2008). La Figura 6 muestra el comportamiento de este parámetro durante el proceso.

Figura 6.

Evolución del pH de los tratamientos evaluados.



Fuente: Elaboración propia.

Durante el proceso de compostaje, los valores de pH experimentaron un aumento progresivo desde 6.5, 6.2, 5.6 y 5.6 unidades para T1, T2, T3 y T4 respectivamente, hasta alcanzar valores finales de 7.1, 8.0, 7.5 y 8.1 unidades, respectivamente. Durante los primeros 10 días se observó un incremento gradual en los niveles de pH, el cual podría atribuirse a la mineralización de los compuestos nitrogenados (proteínas) presentes en los RA, así como a la producción de amoníaco que se genera en condiciones de temperatura elevada y pH básico. Cabe destacar que la adición del Bch en los tratamientos T3 y T4 generó temperaturas y valores de pH superiores, lo que se tradujo en una mayor pérdida de amoníaco en comparación con otros tratamientos (Soto-Paz et al., 2022).

Este incremento en el pH se observó de manera similar en todos los tratamientos, a excepción del T1, que presentó un incremento paulatino los 7 primeros días. Este comportamiento puede ocurrir por la ausencia de RA y a la formación de ácidos orgánicos de cadena larga que se generan por la presencia de hojas. Las hojas, al ser un material rico en carbono, pueden tener una

descomposición más lenta y liberar compuestos ácidos durante el proceso de descomposición lo que puede influir en el pH del sistema de compostaje (Torres-Lozada et al., 2020). Luego de esto tienden a mantenerse en un rango entre 7.5 a 8.7 unidades presentando descensos los cuales se pueden atribuir a procesos relacionados con la nitrificación como la acidificación natural, la producción de compuestos fenólicos, así como la volatilización del amoníaco (Oviedo-Ocaña et al., 2021).

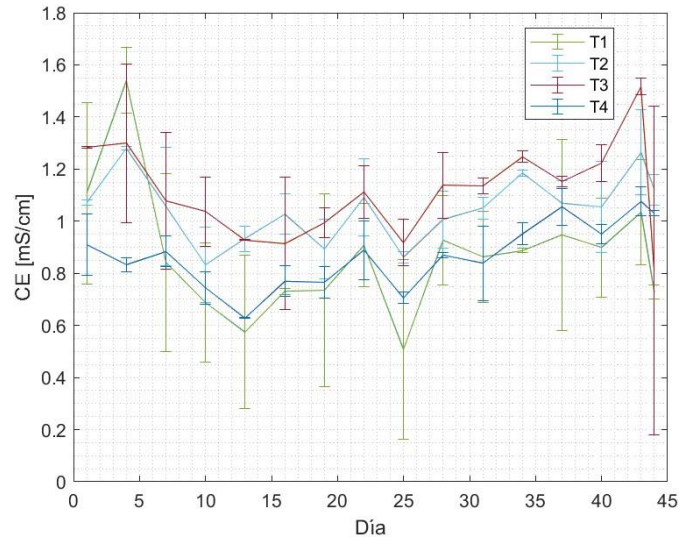
Para cada uno de los tratamientos se obtuvieron valores máximos de 8.9 unidades para T2 y T4, de 8.3 unidades para T1 y 8.2 unidades para T3, manteniéndose en los valores obtenidos en otros estudios (pH alcalino entre 8 a 9 unidades) como el Ojeda-Barón et al., (2022) y Oviedo-Ocaña et al., (2019) en el tratamiento de sustratos como los abordados en este estudio. La adición de Bch pudo tener un efecto de neutralización en el pH, ayudando a mantenerlo en un rango favorable (7.5 – 9 unidades). Además, estadísticamente no hubo diferencias significativas entre los cuatro tratamientos ($p > 0.05$).

4.1.4. Conductividad eléctrica (CE).

La CE presenta la concentración de iones inorgánicos solubles (sales) en agua presentes en el compostaje; está determinada por la composición y propiedades del material presente en los sustratos (Marín-Bahamón et al., 2019). El comportamiento de la CE se presenta en la Figura 7.

Figura 7.

Evolución de la CE de los tratamientos evaluados.



Fuente: Elaboración propia.

Los tratamientos T1, T2, T3 y T4 tomaron valores iniciales de 1.11, 1.07, 1.28 y 0.91 mS/cm, respectivamente. Durante los primeros días aumentó la CE debido a la degradación de la materia orgánica por microorganismos donde se liberan minerales como fosfato, amoníaco y potasio (Hernández-Gómez et al., 2020) llevando a los tratamientos T1, T2 y T3 a llegar un máximo de 1.54, 1.28, y 1.30 mS/cm respectivamente; el tratamiento T4 presentó en sus primeros días un descenso hasta llegar a 0.83 mS/cm.

El comportamiento observado en el tratamiento T4, donde la CE experimentó una disminución seguida de un aumento, puede ser explicado por el efecto del Bch en el proceso de compostaje. Durante los primeros días del compostaje, se produce una actividad microbiana intensa que genera una gran cantidad de ácidos orgánicos. Esto puede dar lugar a una disminución en la CE del compost, ya que los ácidos orgánicos acidifican el medio. Sin embargo, a medida que avanza el proceso de compostaje, el Bch actúa como un agente neutralizador, elevando el pH y promoviendo la descomposición de los ácidos orgánicos. Además, debido a su alta porosidad y

capacidad de adsorción, el Bch mejora la conductividad iónica y la estructura del compost, facilitando una mejor circulación de iones en el medio. Por lo tanto, la disminución inicial en la CE observada en el tratamiento T4 puede ser atribuida a la combinación de estos dos factores (Oviedo-Ocaña et al., 2021).

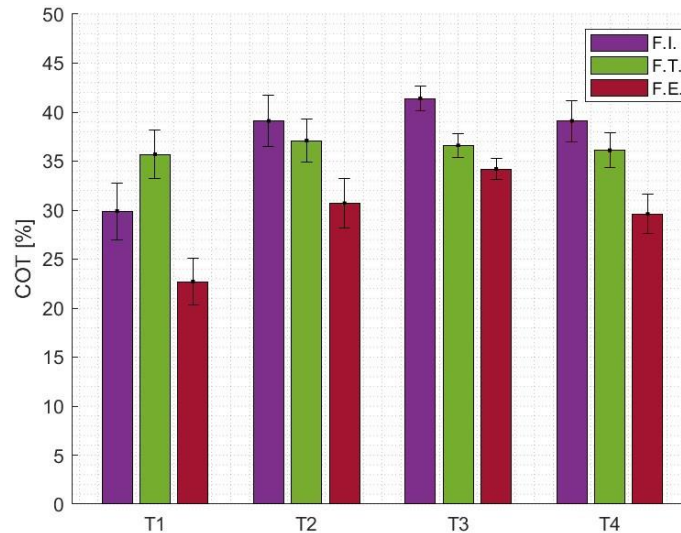
A partir del 4 día, los tratamientos presentaron descensos que se pueden relacionar a la precipitación y lixiviación de sales minerales (Ojeda-Barón et al., 2022). La evolución de este parámetro presentó aumentos y disminuciones en sus valores observándose una estabilidad en el día 31. Al final del proceso, los valores de CE carecieron de diferencias estadísticas significativas ($p>0.05$) entre los tratamientos, tomando valores de T1, T2, T3 y T4 de 0.73, 1.12, 0.81 y 1.03 mS/cm, respectivamente. Estos resultados fueron inferiores a 3 mS/cm que es considerado como límite para generar un potencial efecto fitotóxico por salinidad (Hernández-Gómez et al., 2021).

4.1.5. Carbono orgánico total (COT)

El carbono es una de las principales fuentes de energía para los microorganismos, parte de esta es usada para las actividades metabólicas y el resto de esta energía es liberada en forma de calor. Se observó una disminución del COT en todos los tratamientos de acuerdo con la degradación de polímeros. Durante la fase inicial T1 presentó un menor porcentaje (29.9 %) de COT en comparación con las demás muestras (39.1%, 41.4% y 39.1% respectivamente). La Figura 8 presenta el COT durante el proceso de compostaje.

Figura 8.

Evolución del COT de los tratamientos evaluados. F.I.: Fase inicial, F.T.: Fase termofílica, F.E.: Fase enfriamiento.



Fuente: Elaboración propia.

Durante la fase termofílica se presentaron valores de COT en los tratamientos T1, T2, T3 y T4 con porcentajes de 35.7%, 37.1%, 36.6% y 36.1%, respectivamente. Estos resultados reflejan el aumento de la degradación de la materia debido a la actividad microbiana, que utiliza el carbono como su principal fuente de energía (Ojeda-Barón et al., 2022). A medida que los microorganismos consumen el carbono presente en el compostaje, se produce calor y se acelera la descomposición de la materia orgánica, lo que resulta en una disminución del COT. Sin embargo, se observó que el T1 presenta un aumento en el COT durante esta fase, este comportamiento podría atribuirse a la ausencia de materia orgánica de rápida degradación. Es posible que los RV presentes en la mezcla de T1 contengan materiales orgánicos que requieren más tiempo para descomponerse completamente, lo que contribuiría al aumento del COT en comparación con los demás tratamientos (Reyes-Torres et al., 2018).

Finalmente, en la fase de enfriamiento los tratamientos T1, T2, T3 y T4 presentaron valores de 22.7%, 30.7%, 34.2% y 29.6% respectivamente. Durante esta etapa, la actividad microbiana disminuye causando una reducción en el consumo de carbono y la degradación de la materia orgánica. T1 mostró un comportamiento similar a lo indicado por Oviedo-Ocala et al., (2021).

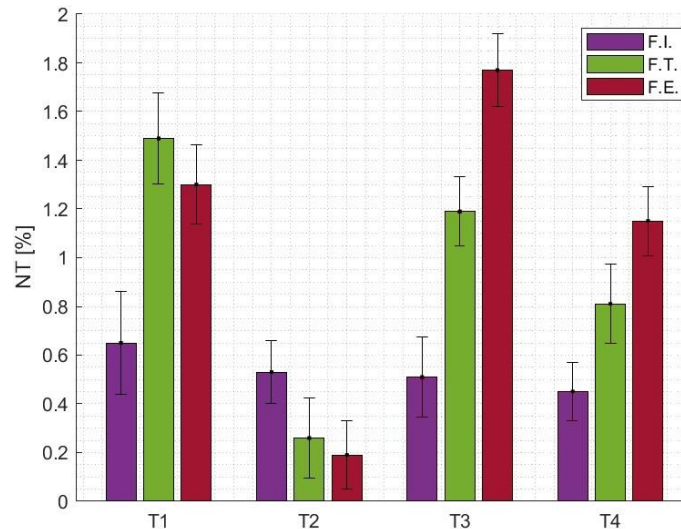
Los tratamientos que incluyeron la adición de Bch presentaron un comportamiento similar al reportado por Feng et al., (2022) en el compostaje de RV con sedimentos de estanques de lodos de tratamiento de aguas residuales. Según estos autores, el Bch presenta una estructura aromática similar al grafito, lo que facilita la transferencia de electrones a través de la matriz de carbono. Este proceso puede incrementar el suministro de oxígeno en los materiales de compostaje y, por ende, mejorar la biodegradación de la materia orgánica. Estos resultados sugieren que la incorporación de RA junto con aditivos en el compostaje de residuos verdes potenció la actividad biológica y estimuló la secreción de enzimas especializadas en la descomposición de la materia orgánica (Malinowski et al., 2019).

4.1.6. Nitrógeno total (NT)

El nitrógeno es el nutriente necesario durante el proceso de compostaje que permite a los microorganismos crear nuevas células mediante ciclos adicionales y seguir carbonizando (Saldarriaga-Elorza et al., 2009). Las diferentes formas de los RA y RV afectan la mineralización del nitrógeno. La Figura 9 muestra el comportamiento que presentó esta variable durante el proceso.

Figura 9.

Evolución del NT de los tratamientos evaluados. F.I.: Fase inicial, F.T.: Fase termofílica, F.E.: Fase enfriamiento.



Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente, T1, T2, T3 y T4 obtuvieron valores de 0.65%, 0.53%, 0.51% y 0.45%, respectivamente. El T1 (solo contiene RV) presenta un comportamiento esperado debido a que la lignocelulosa tiende a retener N causando una menor degradación (Alokika et al., 2022), en la etapa termofílica la disponibilidad de NT era la mayor (1.49%), pero conforme avanzó el tiempo del proceso las pérdidas se reducen hasta finalizar la etapa de enfriamiento con 1.30%.

La presencia de NT en los RA puede ocasionar su pérdida durante el proceso de compostaje. No obstante, se encontró que la incorporación de roca fosfórica, debido a su alta porosidad, actúa como absorbente de amoníaco y favorece la conservación del NT (Oviedo-Ocaña et al., 2021) en el tratamiento T2. En esta fase, los valores de NT oscilaron entre el 0.26% en la etapa termofílica y el 0.19% en la etapa final. Por otro lado, en los tratamientos T3 y T4 se observó un incremento en el contenido de NT debido a la mineralización de la materia orgánica, alcanzando niveles de disponibilidad del 1.19% y 0.81%, respectivamente, en la fase termofílica.

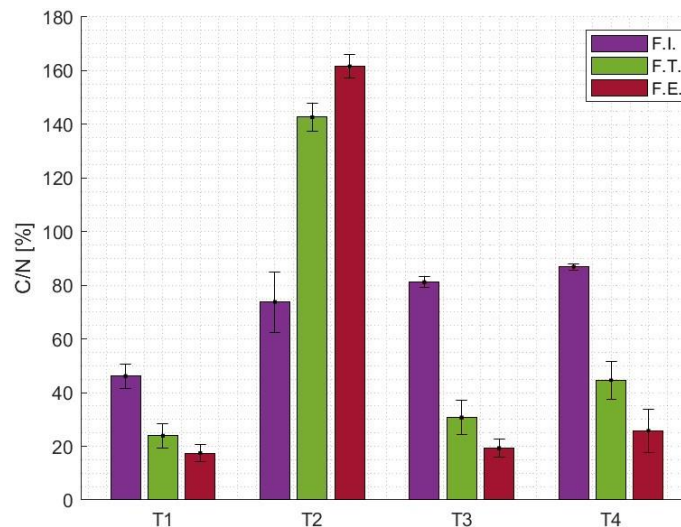
Durante la etapa de enfriamiento, se evidenció un aumento en el contenido de NT en T3 (1.77%) y T4 (1.15%), lo cual se atribuye a la presencia de biochar en la mezcla. El biochar reduce la pérdida de amoníaco y favorece la concentración de NT mediante una menor pérdida de agua. Estos resultados concuerdan con los hallazgos reportados por Godlewska et al., (2017) en sustratos compuestos por lodos de depuradora, residuos de cría de animales y residuos verdes.

4.1.7. Relación C/N

El carbono (C) y el nitrógeno (N) son los dos nutrientes más importantes para el crecimiento y la actividad microbiana presentes en el proceso de compostaje. Por tanto, la relación C/N es un indicador del grado de descomposición de la materia orgánica (Patiño-Criado et al., 2019). Los valores obtenidos se muestran en la Figura 10.

Figura 10.

Evolución de la relación C/N de los tratamientos evaluados. F.I.: Fase inicial, F.T.: Fase termofílica, F.E.: Fase enfriamiento.



Fuente: Elaboración propia.

Durante el proceso de compostaje, es común que la relación C/N disminuya debido al aumento del contenido de nitrógeno y la reducción del contenido de carbono. La relación C/N ideal al inicio del proceso se establece en 30 partes de carbono por parte de nitrógeno. Sin embargo, en los tratamientos T1, T3 y T4 se observó una relación final que osciló entre 11 y 26 partes de carbono por parte de nitrógeno, lo cual indica una disminución en la actividad microbiana. Por otro lado, en el tratamiento T2, la relación final fue superior a la ideal, lo que sugiere que la cantidad de carbono presente estaba por encima del rango establecido. Esta situación puede limitar la capacidad de los procesos biológicos para llevarse a cabo adecuadamente debido a la falta de nitrógeno disponible (Oviedo-Ocaña et al., 2019).

Estudios previos, han demostrado que la aplicación de aditivos como Bch puede contribuir significativamente a reducir la relación C/N durante el compostaje. Por ejemplo, Lehmann et al., (2011) encontraron que la adición de biochar en el compostaje redujo la relación C/N en un 15% en comparación con el compost sin biochar. También observaron una mayor estabilidad del carbono en el compost con biochar, lo que sugiere una mayor eficiencia en la transformación de los residuos orgánicos en compost estable. Asimismo, Spokas et al., (2012) evaluaron el efecto de diferentes tipos de biochar en la relación C/N durante el compostaje y encontraron que la adición de biochar redujo significativamente la relación C/N en comparación con el compost sin biochar. Además, observaron una mayor actividad microbiana en el compost con biochar, lo que indica una mayor eficiencia en la transformación de los residuos orgánicos en compost estable, lo que sugiere que la aplicación del Bch puede ser una estrategia para promover la degradación de la materia orgánica y reducir las pérdidas de nitrógeno en el sistema y mejorar la calidad del compost obtenido.

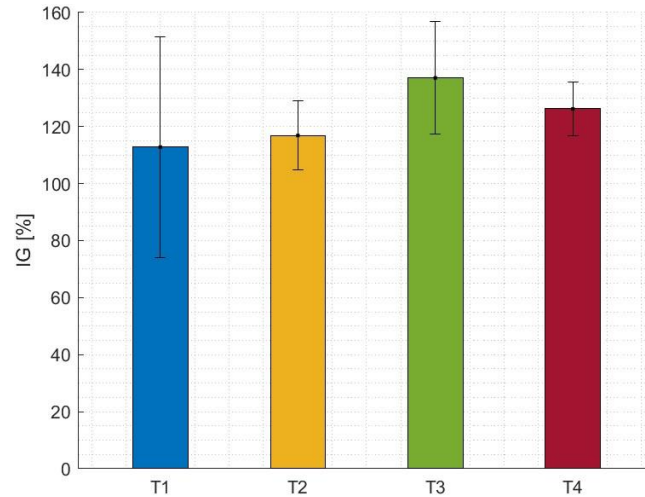
Durante el proceso, se observó un aumento en el valor del NT y una disminución en el valor de COT, ambos dentro del rango recomendado al final del proceso, según Delgado-Arroyo et al., (2019). Durante la fase de enfriamiento, se observó una disminución en la relación C/N en los reactores T1 (17.5), T3 (19.3) y T4 (25.7), mientras que en el T2 (161.6) se observó un aumento. Esto se debe a que la tasa de mineralización del nitrógeno orgánico es mayor a la del carbón orgánico durante la fase de enfriamiento. Esto significa que se está produciendo una descomposición más rápida del nitrógeno con el carbono orgánico. En consecuencia, el compost obtenido es maduro y adecuado para la agricultura en los tratamientos T1, T3 y T4, pero no en T2 cuyos valores se encuentran por encima de los recomendados (11 a 26 partes de carbono por parte de nitrógeno) (Oviedo-Ocaña et al., 2022).

4.1.8. Índice de germinación (IG).

El IG es un índice de fitotoxicidad con el cual se evalúa el potencial de toxicidad que posee un material, se usa como un parámetro para determinar la madurez de una muestra, evaluando la ausencia de fitotoxicidad a través del porcentaje de germinación y crecimiento relativo de la radícula de las semillas (este estudio usó la semilla de rábano). Los resultados del análisis realizado se presentan en las Figuras 11 y 12.

Figura 11.

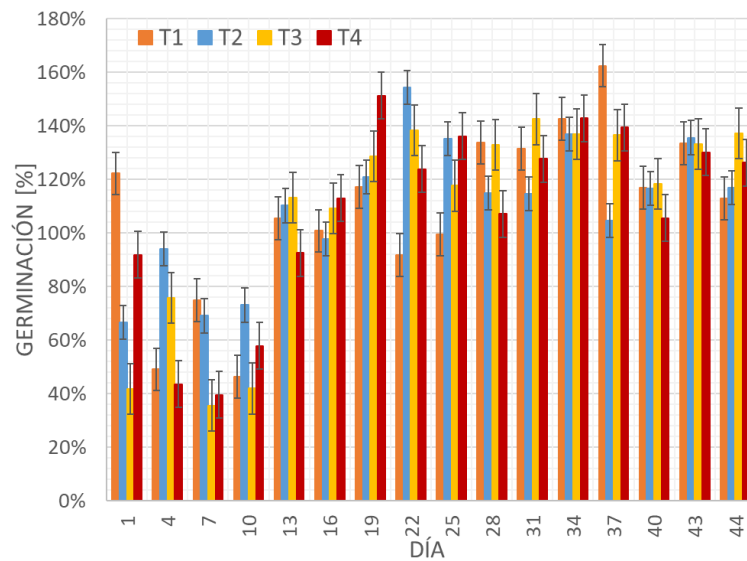
Resultado prueba de germinación del producto final.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12.

Evolución de la germinación de los tratamientos evaluados.



Fuente: Elaboración propia.

Este estudio evaluó el índice de germinación (IG) en diferentes momentos del proceso de compostaje (T1, T2, T3 y T4). Durante la etapa mesofílica, se observaron valores de IG de

122.18%, 66.54%, 41.80% y 91.86% para cada tratamiento, respectivamente. Posteriormente, en la etapa termofílica (día 4), se observó una disminución del IG en todos los tratamientos debido a la degradación de azúcares, aminoácidos, polímeros de origen natural (lignina y celulosa) y hemicelulosa (Oviedo-Ocaña et al., 2015). Sin embargo, en la etapa de enfriamiento (a partir del día 10), se observó una recuperación en los valores de IG, superando el 80% en todos los tratamientos, lo que indica que no hubo efectos fitotóxicos (Ojeda-Barón et al., 2022).

Finalmente, en el día 44 se observó una estabilización de la unidad experimental, lo que se reflejó en un descenso del consumo de oxígeno. En este punto, los tratamientos T1, T2 T3 y T4 presentaron valores de IG de 112.81%, 116.89%, 137.08% y 126.23%, respectivamente. Cabe destacar que los valores de IG superiores al 120% indican la presencia de materia orgánica de fácil asimilación y nutrientes esenciales para la planta, tal como lo indica el estudio realizado por Coelho et al., (2018).

Cuando la relación C/N es menor a 30, se observan mayores indicadores de IG, lo que está relacionado con la degradación de materiales fitotóxicos. Sin embargo, este parámetro disminuye cuando aumentan los parámetros fisicoquímicos como el pH, COT y la relación C/N, tal como se ha observado en estudios anteriores como el de Oviedo-Ocaña et al., (2022).

La adición del Bch en los tratamientos T3 y T4 tuvo un impacto positivo en el compostaje, proporcionando beneficios tanto en la retención hídrica como en la calidad del producto final. La presencia del Bch mejoró la capacidad de retención de agua en el sustrato, lo que facilitó la irrigación de las raíces y promovió una mejor absorción y retención de nutrientes. Además, se observó una reducción en las pérdidas por lixiviación, lo que contribuyó a una mayor eficiencia en la utilización de nutrientes presente en el compostaje. Esto produjo un efecto bioestimulante en

las semillas y condujo a la obtención de un producto final más maduro en comparación con los tratamientos sin este aditivo.

Se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p= 0.011$) entre los tratamientos, siendo el tratamiento con Bch al 2% el que obtuvo un mejor IG con un valor de 137.08%. Estos resultados evidencian que la adición del Bch en el proceso de compostaje tuvo un impacto positivo en la calidad del producto final, en términos de valor nutricional para las plantas, lo que sugiere su potencial uso agrícola.

La adición de Bch a la mezcla también tuvo un efecto positivo en el incremento del IG al promover la degradación de sustancias potencialmente fitotóxicas. Además, en los tratamientos con Bch (T3 y T4) se presentó un aumento en la temperatura y una reducción en la etapa de enfriamiento, lo que conlleva a un aumento en la degradación de la materia orgánica por la mayor presencia de microorganismos, los cuales consumen carbono como principal fuente de energía, disminuyendo la presencia de COT en la mezcla e incrementando la CE. La adición de Bch en los tratamientos T3 y T4 no solo mejoró el IG, sino que también promovió la degradación de sustancias potencialmente fitotóxicas y produjo un producto final con un alto valor nutricional para las plantas, lo que sugiere su potencial uso agrícola.

4.2. Influencia del biochar sobre los parámetros de calidad del producto final en el co-compostaje de residuos verdes y de alimentos.

En la Tabla 3 se observa que las características fisicoquímicas del producto final de cada uno de los tratamientos. La humedad fue superior al 35% del producto final en todos los tratamientos, estos valores cumplen con los rangos recomendados por la NTC 5167 (ICONTEC., 2011) y se encuentran por encima del rango de humedad (del 35% hasta el 45%) establecido por

la NCh 2880 (2015). Según la NCh 2880 la humedad por encima del rango óptimo (30% al 45%) puede presentarse una menor eficiencia en el proceso de compostaje, lo cual puede resultar en un producto de menor calidad.

Diferentes estudios han establecido distintos rangos de humedad óptimos para el co-compostaje de residuos orgánicos. Delgado-Arroyo et al., (2019) estudiaron el compostaje de residuos avícolas y mencionaron que la humedad debe estar entre el 40% y el 60% para que la actividad microbiana sea adecuada y se permita la modificación de la estructura de los materiales. Por otro lado, Machacado et al., (2020) indican que la humedad óptima debe estar entre el 50% y el 70% para favorecer el crecimiento microbiano.

En tanto, Ojeda-Barón et al., (2022) establecen un rango óptimo entre el 30% y el 60% para mantener condiciones adecuadas que faciliten el transporte de nutrientes y la actividad biológica en el proceso de compostaje. Es importante destacar que estos niveles de humedad están relacionados con el riego previo a la finalización del proceso, realizado en todos los tratamientos. Niveles de humedad alrededor del 50% obtenidos en productos ya estables no son inconvenientes para el proceso de maduración, pero sí lo pueden ser para las actividades de comercialización del producto, como la manipulación, transporte y aplicación (Iglesias et al., 2008).

La CE de los tratamientos estuvo en el rango de 0.7 a 12 mS/cm similar a lo reportado por Ojeda-Barón et al., (2022) estando dentro del límite de los 3 mS/cm recomendado por la NCh 2880 (2015), lo cual indica que no se generan potenciales efectos fitotóxicos. El pH presente al final del proceso es alcalino y están en los valores recomendados por la NTC 5167 (ICONTEC., 2011) y la NCh 2880 (2015) que establecen un rango de pH entre 4 a 9 unidades para los mejoradores de

suelos (Iglesias et al., 2008). Los datos obtenidos no reflejan un cambio significativo para los parámetros de humedad, pH y CE a los tratamientos donde se adiciono Bch.

El COT obtenido osciló entre valores del 30% al 35%, superiores al valor mínimo (15%) sugerido en la NTC 5167 (ICONTEC., 2011), proporcionando el aporte de carbono al suelo que permite incrementar la capacidad de retención del agua y la aireación del suelo (Paz-González et al., 2008).

Los incrementos superiores de temperatura indican materiales inestables, cuando la fase de maduración finaliza, la temperatura del compost debería alcanzar temperaturas máximas cercanas a los medios ambientales (temperatura in situ $24\pm 2^{\circ}\text{C}$) (Iglesias et al., 2008). Con respecto a la prueba de autocalentamiento (ensayo de Rottegrade), utilizado para determinar la estabilidad del producto mediante la evidencia de actividad biológica a través de los cambios térmicos aislando una cantidad relativamente pequeña de material en un vaso de Dewar (Analizador de Calidad Del Compost RM-82 Rottegrade Mes System), como resultado, se evidenció características estables (grado V) (Soto-Paz et al., 2022) en el producto final de todos los tratamientos.

Tabla 3.

Calidad del producto final de cada tratamiento.

Parámetro	NTC 5167	NCh 2880	T1	T2	T3	T4
COT (%)	> 15	-	33.30	33.30	31.35	34.40
CE (mS/cm)	-	< 3	0.73	1.12	0.81	1.03
Humedad (%)	> 35	> 30 < 45	46.8	44.95	52.29	50.39
NT (%)	> 1	≥ 0.5	0.35	1.15	1.30	1.32
pH	> 4	-	7.71	8.04	7.5	8.12

Parámetro	NTC 5167	NCh 2880	T1	T2	T3	T4
	< 9					
IG (%)	-	≥ 80	112.8	116.9	137.1	126.2
C/N (%)	-	≤ 25	66.65	31.47	29.2	26.12
PA (°C)	-	≤ 20	24.96	24.25	23.14	24.02

Nota: T: tratamiento, COT= Carbono Orgánico Total, CE= Conductividad Eléctrica, NT= Nitrógeno Total, pH= Potencial de hidrogeno, IG= Índice de germinación, C/N= Relación carbono y nitrógeno, PA= prueba de autocalentamiento. **Fuente:** Elaboración propia.

5. Conclusiones

Las conclusiones de esta investigación son:

- La adición del Bch en el proceso de co-compostaje de residuos de verdes y de alimentos puede mejorar significativamente la eficiencia del proceso. El Bch ayuda a mantener las temperaturas optimas durante la fase termofílica por un periodo más prolongado (hasta 6 días), lo cual resulta beneficioso, ya que promueve una mayor degradación de los residuos y una mayor eliminación de patógenos.
- En este estudio se ha determinado que la adición de Bch al 2% en el proceso de co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos puede tener un impacto positivo en la germinación de las semillas y, en consecuencia, mejorar la calidad del compost final.
- La incorporación del Bch en el proceso de co-compostaje resulto en productos que cumplen con los requisitos establecidos por la normatividad colombina para su uso como enmienda orgánica. Sin embargo, es importante mencionar que los productos obtenidos de los tratamientos sin adición de Bch tambien cumplieron con estos

requisitos, y no se observaron diferencias significativas entre ambos grupos. Cabe destacar que esta evaluación se centró en parámetros específicos y no se evaluaron todos los parámetros establecidos por la NTC 5167.

6. Recomendaciones

Evaluar biochar en dosis de 1% y 1.5% en las diferentes fases del proceso de co-compostaje de residuos verdes y de residuos de alimentos. Esta evaluación sería altamente beneficiosa para optimizar el proceso, determinar la dosis óptima e identificar el momento más eficaz para su incorporación.

Evaluar la capacidad de liberación de nutrientes que posee el producto final del proceso de co-compostaje. Esto se puede lograr realizando un análisis químico detallado del compost, que permita determinar la cantidad de nutrientes disponibles, como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. Estos son nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y a menudo se presentan como limitantes en el suelo.

Para obtener una caracterización más completa del producto, se podría realizar pruebas de respirometría y análisis de la materia orgánica presente. La respirometría es una técnica que permite medir la actividad biológica del compost, lo que es esencial para determinar su estabilidad y garantizar su eficacia en la agricultura y jardinería. Por otro lado, el análisis de la materia orgánica presente en el compost permite conocer su calidad y capacidad para mejorar la fertilidad del suelo. En conjunto, estas pruebas son fundamentales para obtener información valiosa sobre la calidad y estabilidad del compost, lo que es esencial para su uso eficaz.

Referencias Bibliográficas

- Alokika, Anu, & Bijender. (2022). *Utilization of lignocellulosic plant residues for compost formation and its role in improving soil fertility*. <https://housegrail.com/composting>.
- Analizador de calidad del compost RM-82 Rottegrade Mes system*.
- Awasthi Mukesh Kumar, Duan Yumin, Awasthi Sanjeev Kumar, Liu Tao, & Zhang Zengqiang. (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>
- Brunet Zulueta Julio, Pentón Fernández Gertrudis, Martín Martín Giraldo Jesús, & Peter Schmidt Hans. (2020). *Capacidad de retención de soluciones nutritivas en biochar de Dichrostachys cinerea (L.) Wight & Arn.* 1–8.
- Bueno Márquez P., Díaz Blanco M. J., & Cabrera Capitán F. (2008). *Factores que afectan al proceso de Compostaje*.
- Cardona Susana, & Hernandez Leidy. (2008). Aprovechamiento De Residuos De Podas Mediante Compostaje En La Escuela Militar De Aviación. *Universidad Autónoma Del Occidente, Tesis*, 53–57.
- Chen Hongyu, Awasthi Mukesh Kumar, Liu Tao, Zhao Junchao, Ren Xiuna, Wang Meijing, Duan Yumin, Awasthi Sanjeev Kumar, & Zhang Zengqiang. (2018). Influence of clay as additive on greenhouse gases emission and maturity evaluation during chicken manure composting. *Bioresource Technology*, 266, 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.073>

- Chen Y, Zhang W, Li J, Huang Q, & Huang G. (2018). Effects of rice straw biochar on the composting of food waste: process performance and maturity assessment. . *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 3779–3789.
- Coelho Janerson Jose, Prieto Maria Luz, Dowling Stephen, Hennessy Aoife, Casey Imelda, Woodcock Tony, & Kennedy Nabla. (2018). Physical-chemical traits, phytotoxicity and pathogen detection in liquid anaerobic digestates. *Waste Management*, 78, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.017>
- Delgado Arroyo, M. D. M., Mendoza López, K. L., González, M. I., Tadeo Lluch, J. L., & Martín Sánchez, J. V. (2019). Assessment of the composting process of poultry manure using different mixtures of substrates. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 35(4), 965–977. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.15>
- Delgado Arroyo María Del Mar, Mendoza López Karla Luz, González María Isabel, Tadeo Lluch José Luis, & Martín Sánchez José Valero. (2019). Assessment of the composting process of poultry manure using different mixtures of substrates. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 35(4), 965–977. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.15>
- Delgado Arroyo María Del Mar, Mendoza López Karla Luz, González María Isabel, Tadeo Lluch José Luis, & Martín Sánchez José Valero. (2019). Assessment of the composting process of poultry manure using different mixtures of substrates. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 35(4), 965–977. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.15>
- Feng Xueqing, & Zhang Lu. (2022). Combined addition of biochar, lactic acid, and pond sediment improves green waste composting. *Science of the Total Environment*, 852. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158326>

- Francou Cédric, Linères Monique, Derenne Sylvie, Villio Poitrenaud Maelenn Le, & Houot Sabine. (2008). Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting. *Bioresource Technology*, 99(18), 8926–8934. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.071>
- Gaviria Cuevas Jenny, Soto Paz Jonathan, Manyoma Velasquez Pablo, & Torres Lozada Patricia. (2019). Trends in research on the supply chain management of municipal solid waste. *Informacion Tecnologica*, 30(4), 147–154. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000400147>
- Godlewska Paulina, Schmidt Hans Peter, Ok Yong Sik, & Oleszczuk Patryk. (2017). Biochar for composting improvement and contaminants reduction. A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 246, pp. 193–202). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.095>
- Hernández Gómez Angélica, Calderón Arley, Medina Camilo, Sanchez Torres Viviana, & Oviedo Ocaña Edgar Ricardo. (2021). Implementation of strategies to optimize the co-composting of green waste and food waste in developing countries. A case study: Colombia. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(19), 24321–24327. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08103-w>
- Hernández-Gómez, A. M. (2020). *Alternativas biotecnológicas para el mejoramiento del proceso y la calidad del producto del co-compostaje de residuos verdes y residuos de alimentos Trabajo*. Universidad Industrial de Santander.
- ICONTEC. (2011). *Norma Técnica Colombiana 5167. Productos para la Industria Agrícola. Productos Orgánicos Usados como Abonos o Fertilizantes y Enmiendas de Suelo*.
- Iglesias Emeterio, Barral María Teresa, & Marhuenda Frutos Carlos. (2008). Indicadores de estabilidad y madurez del compost. *Compostaje*, May 2014, 242–284.

- Jindo Keiji, Sánchez Monedero Miguel A., Hernández Teresa, García Carlos, Furukawa Toru, Matsumoto Kazuhiro, Sonoki Tomonori, & Bastida Felipe. (2012). Biochar influences the microbial community structure during manure composting with agricultural wastes. *Science of the Total Environment*, 416, 476–481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.12.009>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2011.04.022>
- Liu Wei, Huo Rong, Xu Junxiang, Liang Shuxuan, Li Jijin, Zhao Tongke, & Wang Shutao. (2017). Effects of biochar on nitrogen transformation and heavy metals in sludge composting. *Bioresource Technology*, 235, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.052>
- López Cano Inés, Roig Asunción, Cayuela María Luz, Alburquerque Jose Antonio, & Sánchez Monedero Miguel Angel. (2016). Biochar improves N cycling during composting of olive mill wastes and sheep manure. *Waste Management*, 49, 553–559. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.031>
- Lou Gold. (2015). *Biochar, el carbón que no se quema* - Blog CREAM. <https://blog.creaf.cat/es/noticias/biochar-el-carbon-que-no-se-quema/>
- Machado, C. R., & Hettiarachchi, H. (2020). Composting as a Municipal Solid Waste Management Strategy: Lessons Learned from Cajicá, Colombia. In *Organic Waste Composting through Nexus Thinking: Practices, Policies, and Trends* (pp. 17–38). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36283-6_2

- Malinowski Mateusz, Wolny Kołodka Katarzyna, & Vaverková Magdalena Daria. (2019). Effect of biochar addition on the OFMSW composting process under real conditions. *Waste Management*, 84, 364–372. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.011>
- Marín Bahamón D. (2019). *Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales provenientes de una PTAR del municipio de Sopó Cundinamarca para la producción de un fertilizante orgánico-mineral*. 1–9. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.126.1.78>
- Mayes-Ramírez, M. M., Gálvez-Sánchez, F. J., Ramos-Ridao, Á. F., & Molina-Moreno, V. (2023). Urban Waste: Visualizing the Academic Literature through Bibliometric Analysis and Systematic Review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15031846>
- Méndez Fernández Andrea. (2017). *Cambio en las propiedades químicas de un biochar de sarmientos de vid por adición a pilas de compostaje*. 1–52.
- Montgomery D. C. (2004). Diseño y análisis de experimentos. In *Limusa Wiley* (pp. 21–692).
- NCh 2880. (2015). *Norma Chilena NCh 2880 “compost – requisitos de calidad y clasificación”*. 1–27.
- Ojeda Barón Ludwing, & Joya Rangel Fernando. (2022). *Compostaje de residuos verdes y de alimentos. Efecto de la adición de un inóculo bacteriano sobre el proceso y la calidad del producto del co-compostaje de residuos verdes y de residuos de alimentos*.
- Oviedo Ocaña E. R., Dominguez I., Komilis D., & Sánchez A. (2019). Co-composting of Green Waste Mixed with Unprocessed and Processed Food Waste: Influence on the Composting Process and Product Quality. *Waste and Biomass Valorization*, 10(1), 63–74. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0047-2>

- Oviedo Ocaña E. R., Torres Lozada P., Marmolejo Rebellon, L. F., Hoyos L. V., Gonzales S., Barrena R., Komilis D., & Sanchez A. (2015). Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: Correlation among physical, chemical and biological indices. *Waste Management*, *44*, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.034>
- Oviedo Ocaña Edgar Ricardo, Hernández Gómez Angélica María, Ríos Marcos, Portela Anauribeth, Sánchez Torres Viviana, Domínguez Isabel, & Komilis Dimitrios. (2021). A comparison of two-stage and traditional co-composting of green waste and food waste amended with phosphate rock and sawdust. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(3), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su13031109>
- Oviedo Ocaña Edgar Ricardo, Hernández Gómez Angélica María, Ríos Marcos, Portela Anauribeth, Sánchez torres Viviana, Domínguez Isabel, & Komilis Dimitrios. (2021). A comparison of two-stage and traditional co-composting of green waste and food waste amended with phosphate rock and sawdust. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(3), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su13031109>
- Oviedo Ocaña Edgar Ricardo, Soto Paz Jonathan, Torres Viviana Sánchez, Castellanos Suarez Laura Johana, & Komilis Dimitrios. (2022). Effect of the addition of the *Bacillus* sp., *Paenibacillus* sp. bacterial strains on the co-composting of green and food waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107816>
- Parra-Orobio, B. A., Soto-Paz, J., Hernández-Cruz, J. A., Gómez-Herreño, M. C., Domínguez-Rivera, I. C., & Ocaña-Oviedo, E. R. (2023). Evaluation of Biochar as an Additive in the Co-Composting of Green Waste and Food Waste. *Sustainability*, *15*(9), 7437. <https://doi.org/10.3390/su15097437>

- Patiño Criado Andres. (2019). *Efecto de un inoculante comercial sobre las características físicas, químicas y biológicas a lo largo del proceso de co-compostaje de porqueriza, pulpa de café y aserrín.*
- Paz González Antonio. (2008). *Análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo tras la adición de compost procedente de RSU.*
<https://www.researchgate.net/publication/266883243>
- Qian Shixian, Zhou Xuerong, Fu Yukui, Song Biao, Yan Huchuan, Chen Zhexin, Sun Qian, Ye Haoyang, Qin Lei, & Lai Cui. (2023). Biochar-compost as a new option for soil improvement: Application in various problem soils. *Science of The Total Environment*, 870, 162024. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.162024>
- Rawoteea Soonita Anjeena, Mudhoo Ackmez, & Kumar Sunil. (2017). Co-composting of vegetable wastes and carton: Effect of carton composition and parameter variations. *Bioresource Technology*, 227, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.019>
- Reyes Torres M., Oviedo Ocaña E. R., Dominguez I., Komilis D., & Sánchez A. (2018). A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies. *Waste Management*, 77, 486–499. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.037>
- Saldarriaga Elorza J. F. (2009). *Compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en el proceso de compostaje de los residuos sólidos urbanos con separación en la fuente y su efecto en la salud humana.* 1–135.
- Sánchez Díaz Ignacio. (2009). *Estudio Técnico y Económico de una Planta de Tratamiento de Residuos Vegetales en Getafe.* 97.
- Sánchez García M., Albuquerque J. A., Sánchez Monedero, M. A., Roig A., & Cayuela M. L. (2015). Biochar accelerates organic matter degradation and enhances N mineralisation

- during composting of poultry manure without a relevant impact on gas emissions. *Bioresource Technology*, 192, 272–279. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2015.05.003>
- Soil Health. (2023). *Compostaje con BioChar | wakefield BioChar*. <https://www.wakefieldbiochar.com/es/soil-health/how-to-compost-with-biochar/>
- Soobhany Nuhaa. (2018). Assessing the physicochemical properties and quality parameters during composting of different organic constituents of Municipal Solid Waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 1979–1988. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.02.049>
- Soto Paz Jonathan, Oviedo Ocaña Edgar Ricardo, Angarita Rangel María Angélica, Rodríguez Flórez Lesly, Castellanos Suarez Laura Johana, Nabarlatz Debora, & Sanchez Torres Viviana. (2022). Optimization of lignocellulolytic bacterial inoculum and substrate mix for lignocellulose degradation and product quality on co-composting of green waste with food waste. *Bioresource Technology*, 359. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127452>
- Spokas, K. A., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Archer, D. W., Ippolito, J. A., Collins, H. P., Boateng, A. A., Lima, I. M., Lamb, M. C., McAloon, A. J., Lentz, R. D., & Nichols, K. A. (2012). Biochar: A Synthesis of Its Agronomic Impact beyond Carbon Sequestration. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 973–989. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0069>
- Torres Lozada Patricia, Marmolejo Rebellón Luis Fernando, Arias Giraldo Cielo, Foronda Zapata Kevin, & Soto Paz Jonathan. (2020). Efecto de la incorporación de pasto estrella sobre el mejoramiento del proceso y la calidad del producto del compostaje de biorresiduos. *Revista EIA*, 17(33). <https://doi.org/10.24050/reia.v17i33.1352>

- Yao Y, Gao B, Zhang M, Inyang M, Zimmerman A R, Cao X, & Li Y. (2019). Effects of bamboo biochar on the composting of garden waste: A comprehensive evaluation of maturity indicators and microbial community dynamics. *Bioresource Technology*, 276, 155–163.
- Zurita Martínez Florentina. (2015). Manual de compostaje del agricultor. In *Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*. <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>