

Análisis del efecto de la adición de co-sustratos sobre el proceso y la calidad del  
producto del compostaje de estiércol de pollo

Daniela Cristina Miramón Camargo y Ferney Leonardo Piamonte Martínez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero(a) químico

Director:

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Ing. Sanitario, MSc, PhD

Codirectores:

Viviana Sánchez Torres

Ing. Química, PhD

María Fernanda Ríos Mercado

Ing. Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

A Dios Todopoderoso, mis padres, Humberto Miramón y Martha Camargo que han forjado en mí, el carácter necesario para afrontar cada reto presentado en mi camino universitario con su apoyo emocional y económico constante, amor incondicional, y sacrificios, sin ustedes no lo hubiera logrado.

A Jose Antonio Pérez, cuya presencia en mi vida ha sido un recordatorio constante de la importancia de creer en uno mismo. Este logro también es tuyo, pues has influido profundamente en mi desarrollo personal y profesional.

Daniela Cristina Miramón Camargo

### **Dedicatoria**

Primero a Dios por las bendiciones que ha concedido en mi vida y por permitirme culminar esta etapa satisfactoriamente.

A las personas más importantes de mi vida, mis padres, Margarita Martínez y Leonardo Piamonte, por todos los sacrificios que han hecho por mí, por siempre velar por mi futuro, agradezco tenerlos como mis padres y me siento orgulloso de ser su hijo.

A mi hermano, Brayán Oswaldo Piamonte Martínez, porque me ha enseñado que, a pesar de las dificultades, nunca hay que rendirse.

A Fabian Gil, Alexa Morales y Karol Martínez por ser mi segunda familia que me ha apoyado incondicionalmente.

A mis amigos que me han acompañado en mi formación académica y personal, especialmente a Ashly, Sofía, Diego, Felipe y Yely por escuchar, aconsejar, regañar y ser esas personas que siempre saben que decir, los llevo en mi corazón.

Ferney Leonardo Piamonte Martínez

### **Agradecimientos**

A la universidad Industrial de Santander, a la escuela de Ingeniería Química y a los docentes que contribuyeron en nuestra formación como personas y profesionales

A Ing. Sanitario, MSc, PhD, Edgar Ricardo Oviedo Ocaña por darnos la confianza de desarrollar este proyecto, brindándonos su apoyo y conocimiento

A nuestras co-directoras, Ing. Química, PhD, Viviana Sánchez Torres e Ing. Civil, María Fernanda Ríos Mercado por brindarnos su apoyo y conocimiento

Al grupo de investigación GPH de la escuela de ingeniería civil y los técnicos de laboratorio.

A los técnicos de la escuela de ingeniería química, Eduardo y Wilson, por su disponibilidad y colaboración en el momento más crucial del proyecto.

**Tabla de Contenido**

**Introducción ..... 12**

**1. Objetivos ..... 14**

1.1 Objetivo General..... 14

1.2 Objetivos Específicos..... 14

**2. Marco conceptual..... 15**

2.1 Marco conceptual..... 15

Definición de residuos ..... 15

Etapas del compostaje..... 16

Parámetros de control ..... 17

Calidad del compost..... 18

**3. Estado del arte..... 19**

**4. Metodología ..... 22**

4.1 Fase 1: Selección y caracterización de co-sustratos potenciales ..... 22

Recopilación y revisión de información basada en saberes previos ..... 22

Caracterización y selección de co-sustratos..... 23

4.2 Fase 2: Efecto de los co-sustratos sobre la eficiencia del proceso de compostaje.... 24

Diseño de la mezcla ..... 24

Montaje experimental ..... 25

Monitoreo del proceso ..... 26

4.3 Fase 3: Efecto de los co-sustratos en la calidad del compostaje..... 30

Análisis de laboratorio producto final..... 30

Análisis estadístico de datos ..... 30

<b>5.</b>	<b>Análisis de resultados .....</b>	<b>31</b>
5.1	Fase 1: caracterización y selección de co-sustratos .....	31
5.2	Fase 2: Análisis del efecto de los co-sustratos sobre el proceso de co-compostaje de estiércol de pollo. ....	33
	Temperatura .....	33
	pH.....	35
	Conductividad eléctrica .....	37
	Índice de germinación.....	38
	Sólidos volátiles .....	40
	Contenido de nutrientes .....	41
5.3	Fase 3: Análisis del efecto de los co-sustratos en la calidad del producto final del co-compostaje de estiércol de pollo. ....	44
<b>6.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>49</b>
<b>7.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>51</b>
	<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>52</b>
	<b>Apéndices .....</b>	<b>62</b>

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 .....	15
Tabla 2 .....	16
Tabla 3 .....	17
Tabla 4 .....	25
Tabla 5 .....	31
Tabla 6 .....	44
Tabla 7 .....	48

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 .....	22
Figura 2 .....	26
Figura 3 .....	29
Figura 4 .....	33
Figura 5 .....	36
Figura 6 .....	37
Figura 7 .....	39
Figura 8 .....	41
Figura 9 .....	42

**Lista de apéndices**

Apéndice 1 ..... 62

## Resumen

**Título:** Análisis del efecto de la adición de co-sustratos sobre el proceso y la calidad del producto del compostaje de estiércol de pollo\*

**Autor:** Daniela Cristina Miramón Camargo y Ferney Leonardo Piamonte Martínez\*\*

**Palabras Clave:** Compostaje, estiércol de pollo, estiércol bovino, residuos de alimentos, cebolla de rama, co-sustratos, termofílica.

**Descripción:** La gestión inadecuada del estiércol de pollo (EP) como apoyo a la fertilización para el cultivo de cebolla de rama (CR) en el páramo de Berlín genera impactos en la calidad de los suelos y fuentes de agua en el ecosistema. El co-compostaje de EP se presenta como una alternativa sostenible para el manejo de dichos residuos orgánicos. En este proyecto se analizará el efecto de la adición de co-sustratos durante el proceso de co-compostaje para la transformación de estos residuos en un producto útil capaz de minimizar los impactos negativos consecuentes de dichas prácticas agrícolas. Para tal fin, se definieron tres tratamientos (porcentaje en peso húmedo): T1= 62 % EP, 23 % residuos de CR, 14 % aserrín (As) y 1 % roca fosfórica (RF); T2= 67 % EP, 22 % residuos de alimentos (RA), 10 % As y 1 % RF; T3= 65 % EP, 19 % estiércol bovino (EB), 15 % As y 1 % RF. El análisis del comportamiento del proceso de compostaje se hizo mediante la medición de parámetros como, la temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE), humedad, sólidos volátiles, e índice de germinación (IG) en las diferentes fases. Los resultados demostraron que el co-compostaje de EP combinado con cada una de las mezclas, logró mantener valores nutricionales adecuados según la norma NTC5167 con relaciones carbono nitrógeno (C/N) de (T1=14.37), (T3=13.44), pérdidas de nitrógeno total (NT) menores al 19 % y temperaturas termofílicas elevadas en todos los tratamientos (T1=59.9 °C) (T2=57.5 °C) y (T3=62.8 °C), sin embargo, T1 logró CE y pH más bajos, 3.93 mS/cm y 8.71 respectivamente, en comparación con T2 y T3, lo cual indica que el producto final obtenido en T1 tiene un valor agrícola potencial.

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Ing. Sanitario, MSc, PhD. Codirectores: Viviana Sánchez Torres, Ing. Química, PhD, María Fernanda Ríos Mercado, Ing. Civil.

Daniela Cristina Miramón Camargo y Ferney Leonardo Piamonte Martínez

### Abstract

**Title:** Analysis of the effect of co-substrate addition on the process and product quality of chicken manure composting. \*

**Author(s):** Daniela Cristina Miramón Camargo y Ferney Leonardo Piamonte Martínez \*\*

**Key Words:** Composting, poultry manure, cattle manure, food waste, spring onion, co-substrates, thermophilic.

**Description:** The inadequate management of unstable poultry manure (EP) as a fertilization support for spring onion crops (CR) in the Páramo de Berlín generates impacts on soil quality and water sources in the ecosystem. Co-composting of EP is presented as a sustainable alternative for managing this organic waste. This project will analyze the effect of adding co-substrates during the co-composting process to transform this waste into a useful product capable of minimizing the negative impacts resulting from these agricultural practices. To this end, three treatments were defined (percentage by wet weight): T1 = 62 % EP, 23 % CR residues, 14 % sawdust (As), and 1 % rock phosphate (RF); T2 = 67 % EP, 22 % food waste (RA), 10 % As, and 1 % RF; T3 = 65 % EP, 19% bovine manure (EB), 15% As, and 1% RF. The analysis of the composting process behavior was carried out by measuring parameters such as temperature, pH, electrical conductivity (EC), moisture, volatile solids, and germination index (GI) during the different phases. The results showed that co-composting EP combined with each of the mixtures achieved adequate nutritional values according to the NTC5167 standard, with carbon-to-nitrogen (C/N) ratios of (T1=14.37), (T3=13.44), total nitrogen (NT) losses below 19%, and high thermophilic temperatures in all treatments (T1=59.9 °C), (T2=57.5 °C), and (T3=62.8 °C), however, T1 achieved lower EC and pH values, 3.93 mS/cm and 8.71 respectively, compared to T2 and T3, indicating that the final product obtained in T1 has potential agricultural value.

---

\* Degree Work

\*\*Faculty of Physicochemical Sciences. School of Chemical Engineering. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Sanitary Engineer, MSc, PhD. Co-Directors: Viviana Sánchez Torres, Chemical Engineer, PhD; María Fernanda Ríos Mercado, Civil Engineer.

Daniela Cristina Miramón Camargo y Ferney Leonardo Piamonte Martínez

## Introducción

Los residuos sólidos orgánicos derivados de actividades agrícolas como los estiércoles de animales se caracterizan por su complejidad de tratamiento (Soto-Paz et al., 2017). Entre ellos se encuentra el estiércol de pollo (EP), el cual se genera masivamente debido a la producción avícola nacional. Un pollo de engorde produce 2.4 kg de estiércol en promedio durante su ciclo de vida (Fondo Nacional Avícola, 2018). En Colombia, durante el año 2023, la producción anual de pollos ascendió a 627,655 aves, lo que resultó en la generación aproximada de 1,506.37 toneladas de estiércol de pollo (Fenavi, 2024). Por tanto, la gestión adecuada de este residuo sólido orgánico representa una problemática que requiere ser abordada con atención.

Tradicionalmente, en Colombia se ha utilizado el estiércol de pollo como enmienda orgánica en la producción agrícola (Fondo Nacional Avícola, 2018), pero este sigue siendo un producto inestable que puede generar un riesgo ambiental, dado que provoca malos olores, prevalencia de plagas, patógenos, contaminación del agua, filtración de metales pesados y emisión de gases de efecto invernadero (Haroon et al., 2018; Reyes-Torres et al., 2018). Una situación representativa de estos impactos ocurre actualmente en el páramo de Berlín Colombia, donde la agricultura (especialmente el cultivo de cebolla de rama) y la ganadería generan dichos efectos ambientales negativos, por el uso constante de este residuo orgánico sin tratar como apoyo a la fertilización de los cultivos (Afanador & Buitrago, 2021; Corponor et al., 2008). Por consiguiente, el compostaje surge como una opción viable para descomponer estos residuos orgánicos de una manera controlada convirtiéndolos en productos estables para su uso posterior (Bian et al., 2019; Trautmann & Krasny, 1997). De esta manera, se evita que estos contaminantes se filtren al ambiente (Sanguino et al., 2009).

Sin embargo, el compostaje de estiércol de pollo por sí solo presenta desafíos asociados al desbalance en la relación carbono nitrógeno (C/N) que inciden en la calidad del compost y podrían promover la pérdida de nutrientes como el nitrógeno. Por lo que es necesario controlar diversas variables que influyen en estos parámetros, como la relación C/N, la temperatura, la humedad, el pH, el tiempo de transformación, entre otros (Bian et al., 2019). La falta de control adecuado de dichas variables claves de monitoreo pueden ocasionar problemas como la deficiencia de nutrientes en el producto final (Reyes-Torres et al., 2018). Estas deficiencias pueden corregirse mediante el ajuste de la relación C/N inicial de la mezcla a valores de 20 a 25 (Bernal et al., 2017) y así favorecer la descomposición, lo que mejora la calidad del producto final (Roger T. Haug, 2017). Para ello se pueden incorporar co-sustratos que mejoren las propiedades fisicoquímicas del compost (Oviedo-Ocaña et al., 2022), como los residuos de alimentos no procesados, estiércoles o residuos de cultivos como la cebolla de rama (Haroon et al., 2018; Hwang et al., 2020). Asimismo, otros materiales que proporcionen porosidad a la mezcla, como el aserrín y cáscara de arroz (Reyes-Torres et al., 2018), lo que facilitaría una adecuada aeración pasiva evitando la compactación exagerada de la mezcla.

Por lo anterior, este proyecto tiene como objetivo evaluar el efecto del co-compostaje de estiércol de pollo en combinación con co-sustratos generados en el páramo de Berlín, con el propósito de obtener un producto apto como apoyo a la fertilización.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Analizar el efecto de la adición de co-sustratos sobre el proceso y la calidad del compostaje de estiércol de pollo en el contexto del páramo de Berlín.

### 1.2 Objetivos Específicos

Seleccionar co-sustratos potenciales que puedan utilizarse en el proceso de co-compostaje de estiércol de pollo.

Determinar el efecto de co-sustratos sobre el proceso de co-compostaje de estiércol de pollo.

Analizar el efecto de co-sustratos en la calidad del producto final del co-compostaje de estiércol de pollo.

## 2. Marco conceptual

### 2.1 Marco conceptual

#### *Definición de residuos*

En la Tabla 1 se presentan las definiciones y el tipo de residuos utilizados para el co-compostaje de estiércol de pollo con otros co-sustratos.

**Tabla 1**

*Definiciones de residuos utilizados en el compostaje*

<b>Residuo</b>	<b>Definición</b>
<b><i>Residuos sólidos urbanos</i></b>	Son materiales generados a partir de las actividades humanas de las zonas urbanas y suburbanas (Mayes-Ramírez et al., 2023), como pueden ser domésticos, comerciales, industriales (construcción o demolición), agrícolas, institucionales y misceláneo (Gupta et al., 2015; Roger T. Haug, 2017).
<b><i>Residuo de producción avícola</i></b>	Definido como estiércol de pollo, proviene de la mezcla de excretas de pollo, plumas y material absorbente que se utiliza en el galpón (Fondo Nacional Avícola, 2018).
<b><i>Residuos de la producción ganadera</i></b>	El estiércol bovino, es un residuo sólido orgánico generado a partir de la producción ganadera ya sea para la producción de leche o carne (Zhang et al., 2024).
<b><i>Residuos de alimentos</i></b>	Son alimentos o residuos que no fueron consumidos y posteriormente fueron desechados, son la fracción más grande de residuos orgánicos (Ebrahimi et al., 2024). Estos se pueden clasificar en procesados, aquellos que pasan por una cocción y no procesados, como podrían ser, frutas, cáscaras, hojas, raíces, semillas, entre otros (Cardona et al., 2008).
<b><i>Materiales de enmienda</i></b>	Material que se añade al sustrato para mejorar el proceso (Reyes-Torres et al., 2018) mejoran las características químicas y actúan como fuente de energía y carbono, suministran nutrientes rápidamente garantizando la eficiencia del proceso (Torres et al., 2005).
<b><i>Materiales de soporte</i></b>	Material orgánico o inorgánico, que se usa para controlar la porosidad y estructura de las pilas de compostaje (Reyes-Torres et al., 2018), garantizando así la aireación de este, para favorecer las condiciones aeróbicas del proceso (Torres et al., 2005).

***Etapas del compostaje***

El compostaje es un proceso de oxidación biológica (Reyes-Torres et al., 2018), en el que se estabilizan residuos orgánicos en un entorno predominantemente aeróbico. Durante este proceso, bacterias, hongos y otros microorganismos transforman el material orgánico en un producto estable que pueda ser utilizado como fertilizante o enmienda orgánica, libre de contaminantes (Bernal et al., 2017; Trautmann & Krasny, 1997). En general, los procesos de compostaje se dividen en cuatro etapas como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Definiciones de las etapas de compostaje*

<b>Etapas</b>	<b>Definición</b>
<b><i>Fase mesófila</i></b> <b>(25 °C – 45 °C)</b>	En esta primera fase, los compuestos ricos en energía y fácilmente degradables, como azúcares y proteínas, son degradados por hongos y actinobacterias. También se desarrollan lombrices de compost, ácaros y otras mesofaunas, que actúan como catalizadores del proceso (L.F. Diaz, 2007), provocando un aumento moderado de la temperatura, que puede llegar hasta 45 °C. Esta fase generalmente dura unos pocos días, aunque su duración depende de la estructura del compost (Trautmann & Krasny, 1997).
<b><i>Fase termofílica</i></b> <b>(45 °C – 65 °C)</b>	En esta fase se produce un incremento de la temperatura (mayores a 45 °C), lo que provoca que los organismos mejor adaptados comiencen a reemplazar casi por completo la flora mesófila, dando paso a bacterias termotolerantes y termófilas (Diaz, 2007). El proceso de degradación continúa rápidamente y la temperatura puede elevarse hasta superar los 60 °C, lo cual es crucial para la higienización, ya que destruye los patógenos, semillas de maleza y larvas de insectos (Leconte et al., 2009). Esta fase puede durar varios días o incluso meses, dependiendo del tamaño del sistema y la composición de la mezcla de compostaje (Diaz, 2007; Trautmann & Krasny, 1997).
<b><i>Fase enfriamiento</i></b>	Cuando la actividad microbiana de los organismos termófilos cesa debido al agotamiento de los sustratos, la temperatura comienza a disminuir y la flora mesófila latente vuelve a colonizar la pila. Esta fase se caracteriza por la degradación de compuestos más difíciles de tratar, como almidones y celulosa (Diaz, 2007).

<b><i>Fase de maduración o curado:</i></b>	En esta última fase, la descomposición continúa y los residuos orgánicos finalmente son transformados en sustancias húmicas estables (Oviedo-Ocaña et al., 2021). Generalmente la proporción de hongos aumenta mientras que el número de bacterias disminuye (Díaz, 2007); esta etapa puede durar de 1 a 12 meses a temperatura ambiente, con el objetivo de garantizar un compost de calidad (Oviedo-Ocaña et al., 2021).
--	--

***Parámetros de control***

En la Tabla 3 se presentan los parámetros utilizados para controlar el proceso del compostaje.

**Tabla 3**

*Definición de parámetros de control*

<b>Parámetro</b>	<b>Definición</b>
<b><i>Relación carbono nitrógeno</i></b>	Es una medida simple del equilibrio de nutrientes y es un factor que influye en la velocidad del proceso (Márquez Bueno et al., 2008), relaciones altas (C/N > 25) ralentizan la descomposición, debido al exceso de materia orgánica y relaciones bajas (C/N < 20) producen pérdidas de nitrógeno (Bernal et al., 2017; Reyes-Torres et al., 2018) siendo, por lo tanto, un parámetro clave para tener en cuenta.
<b><i>pH</i></b>	Tiene una influencia directa en el compostaje y se utiliza para estudiar su evolución, debido a su acción en los procesos microbianos ((Márquez Bueno et al., 2008), es por consiguiente un medidor de madurez del producto final y se espera que se encuentre en un rango de (4-9) (Reyes-Torres et al., 2018).
<b><i>Temperatura</i></b>	Es una medida de las actividades microbianas, las cuales generan energía en forma de calor (Márquez Bueno et al., 2008). Es recomendable que la temperatura no descienda por debajo de 20 °C inhibiendo el proceso (Román et al., 2013). Sin embargo, si la temperatura del compost supera los 65 °C, las poblaciones microbianas beneficiosas también podrían morir.
<b><i>Humedad</i></b>	Es un parámetro estrechamente vinculado a los microorganismos, ya que, como todos los seres vivos, usan el agua como medio de transporte de los nutrientes y elementos energéticos a través de la membrana celular (Román et al., 2013). Este valor se debe mantener en un rango entre 40-60 % dependiendo de la fase del proceso (Román Pilar et al., 2013; Reyes-Torres et al., 2018).

<b><i>Conductividad eléctrica</i></b>	Es la medida de la concentración de sales solubles presentes en el compostaje. De igual forma detecta la presencia de iones amonio y nitratos formados en el proceso (Márquez Bueno et al., 2008). Valores superiores al rango de 3-5 mS/cm pueden inhibir la actividad biológica en suelos (Gand & Nain, 2010).
<b><i>Prueba de autocalentamiento</i></b>	Es el aumento de la temperatura del material medido en comparación con la temperatura ambiental, el cual permite evaluar el grado de estabilización de la materia orgánica (Cardona & Hernández, 2008).
<b><i>Sólidos volátiles</i></b>	Son los compuestos que se volatilizan durante la calcinación del material resultante del proceso de compostaje, (temperatura = 550 °C) (Bahamón, 2019).
<b><i>Índice de germinación</i></b>	El índice de germinación es un parámetro que combina la germinación de semillas y el crecimiento radicular, utilizado para evaluar la presencia de sustancias tóxicas en un material. Un valor inferior al 50% indica una alta fitotoxicidad; entre el 50 % y el 80 % señala una fitotoxicidad moderada; y valores superiores al 80 % se consideran indicativos de la ausencia de fitotoxicidad (Iglesias & Pérez, 1992).

***Calidad del compost***

Un compost de alta calidad puede ser aplicado al suelo sin alterar negativamente sus propiedades físicas, aportando materia orgánica y nutrientes esenciales (Soto & Meléndez, 2004) Además, mantiene un pH neutro, favorable para la agricultura, promueve la actividad microbiana y previene cambios extremos en la temperatura (Lopez, 2013). Con el fin de evaluar el compost final, se utilizan pruebas de laboratorio (relación C/N, IG, humedad, temperatura, sólidos volátiles, pH y CE). Asimismo, se observan características in situ, como el color y el olor, para determinar su madurez y garantizar su idoneidad para uso agrícola (Oviedo-Ocaña et al., 2015).

### 3. Estado del arte

El estiércol de pollo se ha aplicado a suelos agrícolas como enmienda orgánica debido a su fuente de nutrientes para las plantas (Fondo Nacional Avícola, 2018; Hernández, 2017), ya que la dieta de las aves consiste en raciones con alto contenido proteico (Kiehl, 2002). Esta práctica está regulada en Colombia dentro de la resolución ICA 15 (2003) y se ha utilizado en muchas zonas del país. Por otro lado, el compostaje permite producir un abono orgánico de manera estable y controlada, incluso mejor que el estiércol sin compostar, evitando así posibles contaminaciones del suelo y la atmósfera que podrían generarse al aplicar directamente el estiércol sin un tratamiento previo (Dos Santos et al., 2010).

Entre los estudios reportados sobre el compostaje de EP, destaca el planteado por Rizzo et al., (2015) quienes co-compostaron EP con un residuo de alimento (RA) y otros materiales de soporte como el aserrín (As) con proporciones 60 % EP, 20 % RA y 20 % As en peso seco encontrando que se mejora no solo la porosidad, si no que reduce el pH inicial característicamente alto del estiércol, debido a la naturaleza ácida de los RA. Así mismo, equilibra la relación C/N y presenta temperaturas termofílicas con una duración de 37 días lo cual favorece la eliminación de patógenos. Por otra parte, el estudio de Haroon et al., (2018) evaluó la mezcla de EP con residuos de ciprés en una proporción 1:2, posteriormente analizaron la caracterización química al final del proceso. Los resultados mostraron que la adición de residuos verdes (RV) redujo la concentración de metales pesados y aumentó los nutrientes esenciales para las plantas, como fósforo (P), sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg) respecto a una mezcla que contenía solo EP. Bian et al., (2019) investigaron una mezcla con residuos agrícolas típicos, como EP, cáscaras de arroz y hojas de hortalizas. Durante el proceso se generaron temperaturas de hasta 75 °C, lo que permitió la higienización del material. Los resultados mostraron que estas altas temperaturas sostenidas

ayudaron a reducir el contenido de humedad al final del proceso, mejorando así la calidad del producto.

Hwang et al., (2020) estudiaron los efectos del co-compostaje de EP con distintos co-sustratos, como el estiércol bovino (EB), estiércol de cerdo, residuos de plantas y residuos de cultivo de hongos. Los resultados mostraron que algunos co-sustratos, como el estiércol de cerdo, pueden tener efectos negativos, como un incremento de 4.1 veces en la emisión de amoníaco ( $NH_3$ ) durante el proceso de compostaje, en comparación con el co-compostaje de EP y EB. Además, se observó que el tiempo requerido para alcanzar la madurez final aumentó significativamente cuando los tratamientos contenían solo EP con residuos de plantas o residuos de cultivo de hongos, pasando de 60 días en las mezclas de EP con EB a 107 días en estas combinaciones.

Por otra parte, Oviedo-Ocaña et al., (2022) co-compostaron EP con residuos de cebolla de rama (CR) y otros co-sustratos como residuos orgánicos (BW) y As, diseñaron tres tratamientos A, B y C, A contenía (43 % EP+ 41 % BW + 18 % As), por su parte B contenía (52 % EP + 32 % BW + 16% As). El tratamiento C contenía solo 70 % de EP y 30 % de As. Los tratamientos A y B presentaron temperaturas termofílicas rápidamente, sin embargo, el tratamiento C no alcanzó estas temperaturas. Los tratamientos A y B generaron un compost maduro, estable y no fitotóxico (índice de germinación > 80 %), aunque los productos finales de todos los tratamientos mostraron una deficiencia de fósforo total (PT) ( $PT < 1 \%$ ) lo que limita el uso de este compost como fertilizante principal. Estas problemáticas se pueden resolver ajustando la proporción de componentes con alto contenido de carbono orgánico total y nitrógeno para ajustar el equilibrio de la relación carbono nitrógeno. Además, concluyeron que la calidad del producto final puede mejorar agregando roca fosfórica (RF) como material de enmienda al inicio del compostaje.

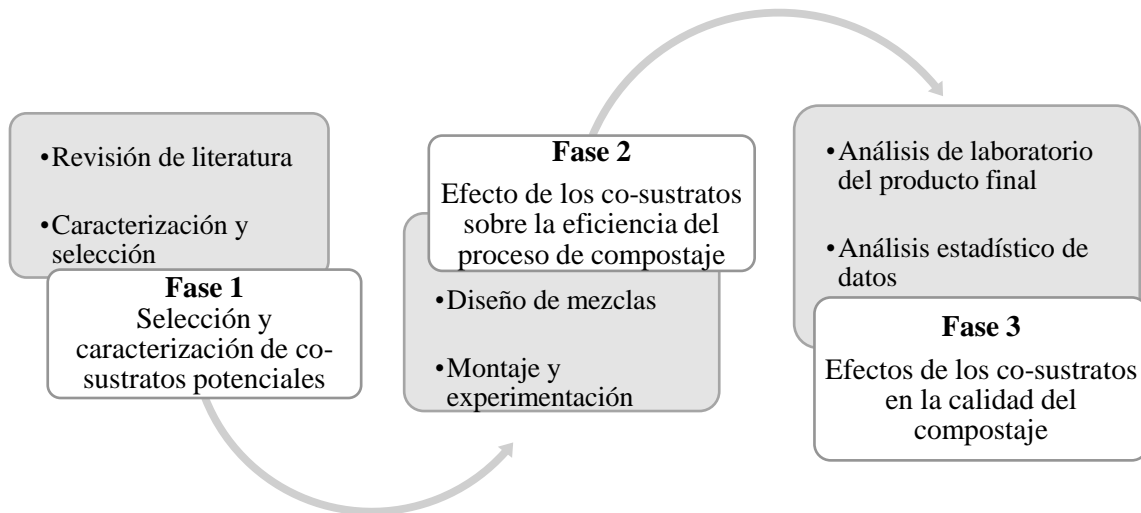
Por último, Ivanović et al., (2024) hicieron mezclas de EP, orujo de uva (OV) (pieles, semillas y pulpa) y raspón de uva (RU) (tallos y estructuras leñosas) en proporciones de 20 % EP % 55 OV y 25 % RU, encontrando que la adición del EP a este tipo de co-compostaje ayudaba a reducir la acidez de la mezcla, se lograron periodos termofílicos más largos a comparación de mezclas que contenían solo RA con OV y RU con fases acidas más cortas (solo 6 días de duración) y una reducción de la materia orgánica (MO) del 12.95 %.

#### 4. Metodología

Para la ejecución de este proyecto se llevaron a cabo las siguientes fases metodológicas:

#### Figura 1

Diagrama de las fases en la metodología de la investigación



#### 4.1 Fase 1: Selección y caracterización de co-sustratos potenciales

##### *Recopilación y revisión de información basada en saberes previos*

Inicialmente se realizó un inventario de materiales disponibles en el contexto del páramo de Berlín con potencial de transformación a través del proceso de compostaje, el cual se realizó por medio de visitas en compañía de miembros del grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) para la selección de posibles co-sustratos, EP, EB, estiércol ovino (EO), CR, RA, RV y As. Se consideraron los siguientes parámetros como temas de interés en la revisión: i) pH, ii) humedad, iii) carbono orgánico total (COT), iv) nitrógeno total (NT), v) relación C/N y vi) conductividad eléctrica (CE). Posteriormente se llevó a cabo una revisión bibliográfica sistemática para seleccionar información

relacionada con el tema de interés. Esta revisión se realizó mediante el uso de motores de búsqueda en bases de datos como Scopus®, ScienceDirect®, entre otros, a los cuales se accedió a través de los recursos proporcionados por la UIS. Se emplearon palabras claves como: “compost”, “poultry manure”, “chicken manure”, “cow manure”, “sheep manure”, “Grass”, “green waste”, “food waste”, “co-composting”, “amendment materials” y “bulking agents”. La búsqueda se restringió a documentos de tipo artículo científico en inglés.

***Caracterización y selección de co-sustratos***

Para la caracterización de los distintos co-sustratos, se utilizaron los datos recopilados en la revisión, los cuales fueron clasificados según los valores nutricionales, basándose en los parámetros propuestos en la sección anterior. Esta información se organizó en una tabla para su posterior análisis. A continuación, se seleccionaron los co-sustratos que se combinaron con EP en las distintas mezclas. Se eligieron los mejores materiales considerando dos aspectos principales: su disponibilidad en el páramo de Berlín y sus propiedades fisicoquímicas favorables para la mezcla, se priorizaron aquellos que ayudaran a mantener un pH cercano a la neutralidad, dentro del rango recomendado entre 6.5 y 8 para el inicio del proceso de compostaje (Bahamón, 2019), valores bajos de CE (CE < 3 mS/cm) (Gaind & Nain, 2010) y un adecuado equilibrio en la relación C/N, con valores en el rango de 20-25 (Bernal et al., 2017). El ajuste de la relación C/N se calculó mediante el uso de la fórmula matemática propuesta por (Trautmann & Krasny, 1997) (ecuación 1).

$$1. \quad R = \frac{W_1[C_1 \times (100 - M_1)] + W_2[C_2 \times (100 - M_2)] + W_3[C_3 \times (100 - M_3)] + \dots}{W_1[N_1 \times (100 - M_1)] + W_2[N_2 \times (100 - M_2)] + W_3[N_3 \times (100 - M_3)] + \dots}$$

$R_n$  = Relación carbono nitrógeno

$W_n$  = Masa del material (kg)

$C_n$  = Carbono (%)

$N_n$  = Nitrógeno (%)

$M_n$  = Contenido de humedad (%)

#### **4.2 Fase 2: Efecto de los co-sustratos sobre la eficiencia del proceso de compostaje**

En esta segunda fase, se evaluó la influencia de diferentes co-sustratos en el proceso de co-compostaje. Se implementó un plan de monitoreo diario de parámetros y se diseñó la mezcla de los tratamientos, basada en la información de las características nutricionales de los distintos co-sustratos.

##### ***Diseño de la mezcla***

Para el experimento, se incorporaron los co-sustratos seleccionados en la fase 1 mezclados de acuerdo con una relación C/N inicial de 20 a 25. Posteriormente, se diseñaron tres tratamientos (T1, T2 y T3), cada uno con una réplica y con peso total por mezcla de 40 kg, como se muestra en la Tabla 4. En cada tratamiento se adicionó RF como aditivo, fundamentado en estudios previos que señalan que las mezclas de este tipo en compostaje maduro no alcanzan los niveles de fósforo requeridos según la norma técnica colombiana (NTC) 5167 (Oviedo-Ocaña et al., 2022). Para garantizar el contenido adecuado de fósforo, se añadió un 1 % de RF en peso. Asimismo, se incluyó As como material de soporte en cada mezcla, con el objetivo de mejorar las propiedades fisicoquímicas del compostaje, aumentar la velocidad de biodegradación y la calidad del producto final (Soto-Paz et al., 2017).

**Tabla 4**

*Proporciones de las mezclas*

<b>Reactor</b>	<b>Mezcla (% peso húmedo)</b>	<b>Masa (kg)</b>
T1	62 %EP+23 %CR+14 %As+1 %RF	24.8 EP+ 9.2 CR+ 5.6 As+ 0.4 RF
T2	67 %EP+22 %RA+10 %As+1 %RF	26.8 EP+ 8.8 RA+ 4 As+ 0.4 RF
T3	65 %EP+19 %EB+15 %As+1 %RF	26 EP+ 7.6 EB+ 6 As+ 0.4 RF

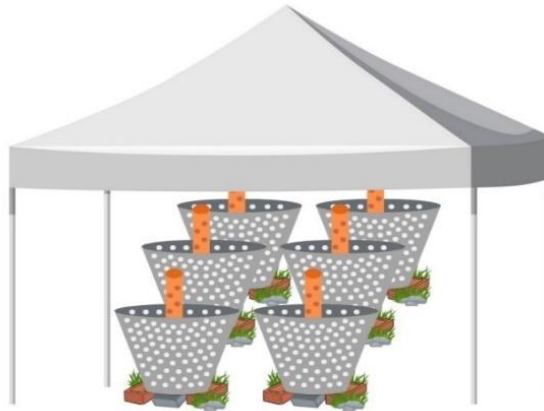
**Montaje experimental**

El experimento se llevó a cabo en las instalaciones de la UIS, donde la temperatura media anual es de 19.7 °C y la precipitación media anual es de 1189 mm (IDEAM, 2017). Se dispuso de un espacio con un área de 6 m de ancho x 11 m de largo aproximadamente. Debido a la probabilidad de precipitaciones, el área de experimentación fue acondicionada mediante la instalación de una carpa de poliéster impermeable para asegurar un entorno adecuado para cada reactor, minimizando así posibles interferencias externas y facilitando la inspección y monitoreo diario de parámetros fisicoquímicos.

Para cada tratamiento, se realizó un montaje a escala laboratorio mediante la adecuación de tanques de PVC revestidos con un material aislante. Los reactores contaban con perforaciones de 2.5 cm distribuidas de forma equidistante, de tal manera que se pudiera alcanzar una correcta aireación pasiva y a su vez evitar pérdidas de calor en la fase termofílica (Rawoteea et al., 2017). Debido a que el suelo no era plano, se niveló usando ladrillos en la base de cada reactor, como se muestra en la Figura 2. Además, se dejó una cavidad considerable para la instalación de un tubo central igualmente perforado, destinado al drenaje de lixiviados y una correcta aireación.

**Figura 2**

*Diseño del montaje experimental en la zona propuesta*



***Monitoreo del proceso***

El monitoreo de los parámetros fisicoquímicos en los tratamientos incluyó la medición de parámetros fundamentales como temperatura, pH, CE, sólidos volátiles y humedad. La temperatura fue medida diariamente durante todo el proceso para evaluar los cambios térmicos asociados. El pH y la CE únicamente fueron medidos diariamente los primeros 14 días. Posteriormente, la frecuencia de estas mediciones se redujo a tres veces por semana durante la fase de enfriamiento y dos veces por semana en la fase de maduración, mientras que los sólidos volátiles se analizaron tres veces por semana a lo largo de todo el proceso. Por su parte la humedad, que debía oscilar en valores entre 40 % a 60 % dependiendo de la fase del compostaje (Reyes-Torres et al., 2018), se monitoreó, controlando que los reactores no registraran valores cercanos al límite inferior establecido del 40 %. La determinación de humedad se realizó mediante método gravimétrico, con secado en horno para la aplicación de la ecuación 2.

$$2. \quad \%H = \frac{(Pmh - Pms)}{(pmh - Pc)} \times 100$$

Donde:

%H= Porcentaje de humedad

Pmh= Peso de la muestra humedad (g)

Pms= Peso de la muestra seca (después del horno de 105°C) (g)

Pc= Peso del crisol (g)

La temperatura se midió utilizando un termómetro bimetálico, con mediciones realizadas en cinco puntos de cada reactor: cuatro en la periferia y uno en el centro (Oviedo-Ocaña et al., 2019). Los demás parámetros fisicoquímicos, pH, sólidos volátiles y CE se evaluaron mediante la recolección de muestras en el área experimental, las cuales se transportaron posteriormente al laboratorio de hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil de la UIS.

Para el pH y CE, se tomó una única submuestra sólida, diluida en agua destilada en una proporción 1:10 (p/v), y se analizó mediante la utilización de un medidor multiparámetro. Los sólidos volátiles se midieron mediante gravimetría calcinando el material a 550 °C (Zhang & Sun, 2017). Se recopilaron datos de los tres tratamientos (T1R1, T2R1, T3R1) y se calculó el promedio con sus réplicas (T1R2, T2R2, T3R2) para realizar posteriormente un análisis de datos más preciso del comportamiento de los parámetros fisicoquímicos en cada tratamiento.

El volteo mecánico de todos los tratamientos se llevó a cabo según el comportamiento de la temperatura y la humedad durante todo el proceso. Los requerimientos hídricos de la mezcla se determinaron utilizando la ecuación 3.

$$3. \quad \text{Humectación} = (Fad - Fap) \times \frac{Ptc}{Da}$$

Donde:

Fad= Fracción de agua deseada(%)

Fap= Fracción de agua presente en la muestra (%)

Ptc= Peso total del compostaje (g)

Da =Densidad del agua (g/L)

Seguidamente se aplicaron las cantidades de agua especificadas en los resultados para mantener un rango adecuado de humedad y lograr maximizar la eficiencia en la degradación y oxigenación del material (Román Pilar et al., 2013; Reyes-Torres et al., 2018). Adicionalmente, para evaluar la estabilidad y madurez del co-compostaje en proceso y como indicador de la transformación adecuada de la materia orgánica, se empleó el índice de germinación (IG) que se midió al inicio de cada fase. Se consideró un IG superior al 80 % como indicador de madurez del producto en términos de fitotoxicidad (Riffaldi et al., 1986).

Para esta prueba, se utilizaron 9 cajas de Petri, tres por cada tratamiento. El material extraído de cada tratamiento se mezcló con agua destilada en proporción 1:10 (p/v); posteriormente, se dejó reposar y se filtró. Luego, la solución obtenida se aplicó en cada caja de Petri, junto con 10 semillas de rábano seleccionadas por su alta sensibilidad a sustancias fitotóxicas (Ver Figura 3) (Komilis & Tziouvaras, 2009). Esta sensibilidad permite detectar la presencia de agentes tóxicos que podrían inhibir la germinación o el crecimiento radicular (Urriola et al., 2021). Se tuvo en cuenta tres cajas de Petri adicionales que se utilizaron como control, empleadas para germinar semillas únicamente con agua destilada para la aplicación de las ecuaciones (4,5,6) (Teresa Varnero et al., 2007).

$$4. \quad PGR = \frac{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en la solución}}{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en el blanco}} * 100$$

$$5. \quad CRR = \frac{\text{Elongación de la raíz en la solución}}{\text{Elongación de la raíz en el blanco}} * 100$$

$$6. \quad IG = \frac{PGR * CRR}{100}$$

Donde:

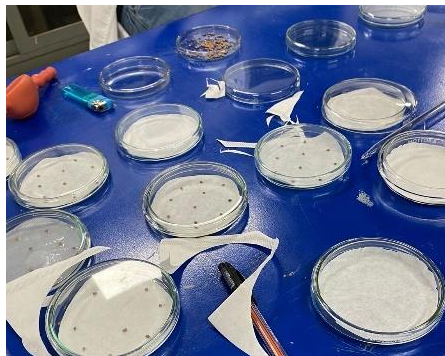
PGR = Porcentaje de germinación relativo

CRR = Crecimiento de raíz relativo (cm)

IG= Índice de germinación (%)

### Figura 3

*Montaje prueba de germinación*



Al alcanzar temperaturas cercanas a la temperatura ambiente, se realizó una prueba de autocalentamiento (PA) para determinar la estabilidad del compost en relación con su actividad microbiológica residual. Esta prueba se realizó utilizando vasos Dewar y termómetros convencionales, con el propósito de registrar las variaciones de temperatura interna respecto a la temperatura ambiente durante un periodo de 10 días.

### **4.3 Fase 3: Efecto de los co-sustratos en la calidad del compostaje**

#### ***Análisis de laboratorio producto final***

Posteriormente, el material compostado fue trasladado al laboratorio de procesos de la Escuela de Ingeniería Química, donde fue procesado mediante un molino de cuchillas y tamizado con malla ASTM N° 35 (0,5 mm), conforme a la normativa NTC 5167 (ICOTEC, 2022). Se extrajo una muestra de 1 kg de cada tratamiento, la cual fue almacenada en refrigeradores a 3-4 °C y enviada a los laboratorios de la Universidad de Antioquia (UDEA) para su caracterización fisicoquímica y análisis microbiológico.

Los análisis incluyeron la cuantificación de humedad, cenizas, nitrógeno total, carbono orgánico total, fósforo total y relación C/N cuyos valores se compararon con los parámetros de referencia para productos de uso agrícola (fertilizantes y enmiendas) según la NTC5167 (ICONTEC, 2022).

#### ***Análisis estadístico de datos***

Haciendo uso del software MathWorks. (2024) MATLAB (versión R2024b) se realizó análisis de varianza (ANOVA) y prueba no paramétrica de Kruskal Wallis cuando los datos no cumplían con los supuestos para realizar ANOVA. Se realizó este análisis para los parámetros monitoreados durante el proceso de compostaje con el fin de saber si existía diferencias significativas entre los distintos tratamientos, tomando la hipótesis nula, en donde todas las medias son iguales con un valor de  $p > 0.05$  la hipótesis es verdad y no existen diferencias significativas. Además, se utilizó Microsoft Excel® (versión 2411) para agrupar y organizar la información recolectada durante el estudio.

### 5. Análisis de resultados

#### 5.1 Fase 1: caracterización y selección de co-sustratos

La Tabla 5 presenta los parámetros fisicoquímicos y sus valores correspondientes, recopilados en la revisión bibliográfica, según el tipo de co-sustrato revisado y sus respectivas referencias.

**Tabla 5**

*Resultados de la caracterización de co-sustratos*

Co-sustrato	pH	Humedad [%]	COT [%]	NT[%]	C/N	CE[mS/cm]	Referencias
<b>EP</b>	8.5 ±0.3	74.6 ±1.8	40.5	2.6	15.6	8.34 ±0.05	(Bian et al., 2019; Oviedo-Ocaña et al., 2022; Ravindran et al., 2022)
<b>EB</b>	7.97 ±0.02	63.48	39.4	2.54 ±0.01	15.51 ± 0.06	2.04 ±0.03	(García-Rández et al., 2025; Gurmessa et al., 2021; Hwang et al., 2020; J. Li et al., 2024)
<b>EO</b>	6.14 ±0.12	68.95 ±0.56	33.0	1.74	19.0	4.01 ±0.01	(Makan, 2015; Orrico et al., 2020; G. Wang et al., 2024)
<b>CR</b>	6.6 ±0.2	67.5 ±1.3	18.8 ±0.4	1.6 ±0.2	11.6 ±0.8	1.2 ±0.3	(Oviedo-Ocaña et al., 2022)
<b>As</b>	6.8 ±0.06	11.5 ±0.1	45.02	0.3	150.06	0.51 ±0.01	(Ravindran et al., 2022; Rizzo et al., 2015; Zhan et al., 2024)
<b>RV</b>	7.5 ±0.1	63 ±2.0	29.87 ±3.8	0.65±0.2	46.19 ±4.43	2.53 ±0.1	(Bargougui et al., 2020; Parra-Orobio et al., 2023)
<b>RA</b>	4.7 ±0.2	78 ±1.5	42.06	1.03	40.84	1.2	(Parra-Orobio et al., 2023; Ravindran et al., 2022; Wang & Zeng, 2018)

Finalmente, los co-sustratos seleccionados para el co-compostaje de estiércol de pollo fueron: EB, CR, RA y As. La selección se realizó en dos etapas: En primer lugar, se consideró la disponibilidad de estos materiales en el páramo de Berlín. Co-sustratos como EO y RV fueron descartados debido a su baja disponibilidad en la región, en comparación con los seleccionados. En segundo lugar, se revisaron los parámetros fisicoquímicos de los co-sustratos presentes en la Tabla 5, priorizando los co-sustratos con un pH entre (6.5 y 8) (Bahamón, 2019) y CE inferior a 3

mS/cm (Gaiind & Nain, 2010). Asimismo, se consideró un equilibrio adecuado en la relación C/N con valores en el rango de 20-25 (Bernal et al., 2017), relación determinada mediante la ecuación 1 (los resultados de la relación C/N se presentan en el apéndice A).

Este enfoque permitió seleccionar co-sustratos que no solo cumplen con los requisitos fisicoquímicos establecidos, sino que también contribuyen a mejorar las condiciones iniciales del proceso de co-compostaje. Aunque los RA presentan un valor de pH que difiere del rango establecido, este parámetro podría ser ventajoso al combinarse con co-sustratos como EP que tiende a valores alcalinos, ya que ayuda a reducir la alcalinidad general y equilibrar la acidez inicial de los RA (Ivanović et al., 2024).

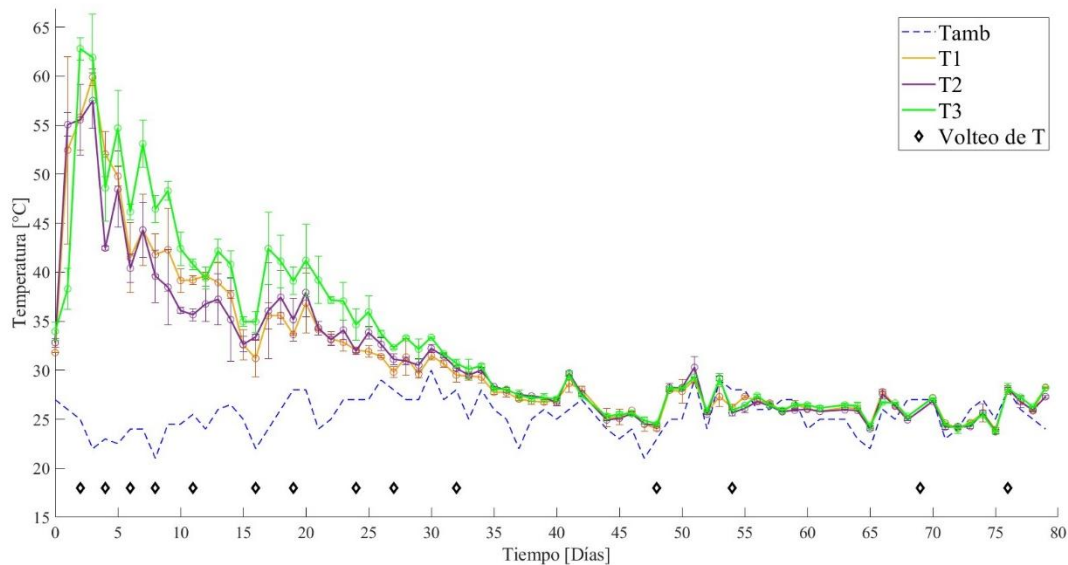
**5.2 Fase 2: Análisis del efecto de los co-sustratos sobre el proceso de co-compostaje de estiércol de pollo.**

*Temperatura*

En la Figura 4 se presentan los perfiles de temperatura para cada tratamiento, junto con los datos de temperatura ambiental y la frecuencia de los volteos manuales realizado en los reactores.

**Figura 4**

*Perfil de temperatura durante el proceso de compostaje*



La temperatura sirve como un indicador crítico, ya que proporciona información sobre la actividad de los microorganismos y la transformación de la materia orgánica a lo largo del proceso de compostaje (Kong et al., 2024). La fase mesofílica tuvo una duración de un día. En los tratamientos T1 y T2, se alcanzaron temperaturas termofílicas ( $T > 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) al finalizar las primeras 24 horas, mientras que T3 alcanzó esta etapa al segundo día. Cabe destacar que T3 registró la temperatura máxima de  $62.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , seguido por T1 con un pico de  $59.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pesar de estas

diferencias, los análisis estadísticos no mostraron variaciones significativas entre los tratamientos ( $p = 0.67169$ ). Este comportamiento puede explicarse por la influencia de los co-sustratos añadidos, ya que su composición rica en carbono o nitrógeno afecta la velocidad y la magnitud del aumento de temperatura durante el compostaje (Cáceres et al., 2016). En particular, los co-sustratos con alto contenido de nitrógeno, como el EP y EB, estimulan la actividad microbiana, lo que genera temperaturas elevadas debido al calor producido durante el metabolismo microbiano (Waqas et al., 2018).

Las temperaturas termofílicas se mantuvieron durante un periodo de 18 días, permitiendo la higienización y eliminación de larvas de insectos y semillas de maleza (Oviedo-Ocaña et al., 2019, 2022). Este comportamiento coincide con lo reportado en estudios previos (Nkansah John et al., 2022), donde se observó que los volteos, realizados para mejorar la aireación, generaban incrementos significativos en la temperatura debido a la actividad de los microorganismos aerobios (Bello et al., 2023).

Por otro lado, en Leconte et al., (2009) se ha documentado que el uso de As como material de soporte en el co-compostaje de EP contribuye a extender la duración de la fase termofílica gracias a su mayor contenido de carbono orgánico disponible, porosidad que aporta a la mezcla, capacidad de retención de agua y accesibilidad al ataque microbiano. Los tratamientos T1 y T2 mostraron temperaturas más bajas en comparación con T3 durante la fase termofílica, esto debido a su composición de RA y CR, materiales con tendencia a la acidez, lo que conlleva a la limitación de la actividad microbiana, coincidiendo con investigaciones previas encontradas en Ivanović et al., (2024). Por otro lado, Cáceres et al., (2016) señalaron que los co-sustratos con alta resistencia estructural, debido a su contenido de lignina, pueden ralentizar el proceso y limitar la temperatura

máxima alcanzada. Este fenómeno es evidente en este estudio, donde los RA en T2 mostraron menores picos de temperatura en comparación con los otros tratamientos. Finalmente, el descenso gradual de la temperatura ( $T < 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) marcó el inicio de la fase de enfriamiento (L.F. Diaz., 2007).

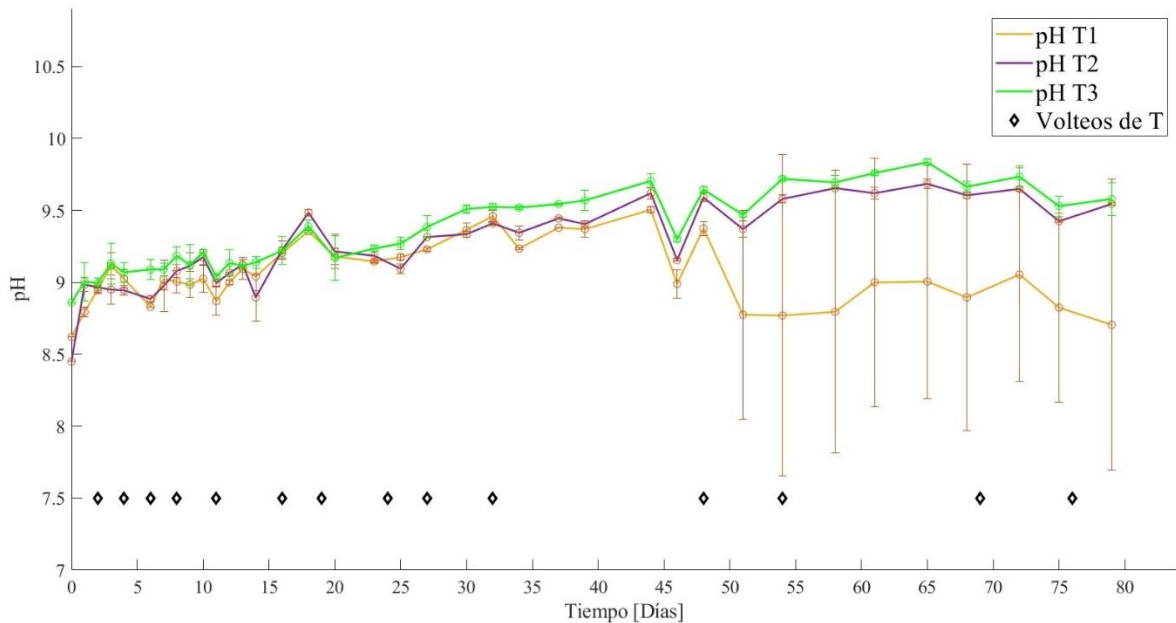
### ***pH***

El pH constituye un parámetro fundamental para evaluar tanto la calidad como el grado de madurez del compost (Leconte et al., 2009; Reyes-Torres et al., 2018), además de ser una medida indirecta del control de la aireación (Márquez Bueno et al., 2008). En la Figura 5 se presenta el comportamiento de este parámetro para los distintos tratamientos al inicio del proceso, se observaron diferencias en los niveles de pH, predominando valores alcalinos, con T3 que registra el nivel más elevado (8.86). Según Bernal et al., (2017) un pH elevado se debe al contenido de carbonatos y amoníaco de los estiércoles presentes en la mezcla.

Gracias a las temperaturas alcanzadas durante la fase termofílica, el pH continuó incrementando hacia valores alcalinos (8.71 – 9.58) en todos los tratamientos. Este incremento se atribuye principalmente a la liberación de amoníaco y dióxido de carbono como resultado de la degradación de proteínas y la bioconversión de nitrógeno orgánico, un fenómeno asociado con el intenso metabolismo microbiano en esta etapa del compostaje (Cáceres et al., 2016). Estos resultados son consistentes con los reportados por Nkansah John et al., (2022) en el co-compostaje de RA con EP, donde se observaron valores alcalinos al finalizar el proceso. Asimismo, se alinean con los resultados reportados por Oviedo-Ocaña et al., (2022) en el co-compostaje de CR con EP.

**Figura 5**

*Perfil de pH durante el proceso de compostaje*



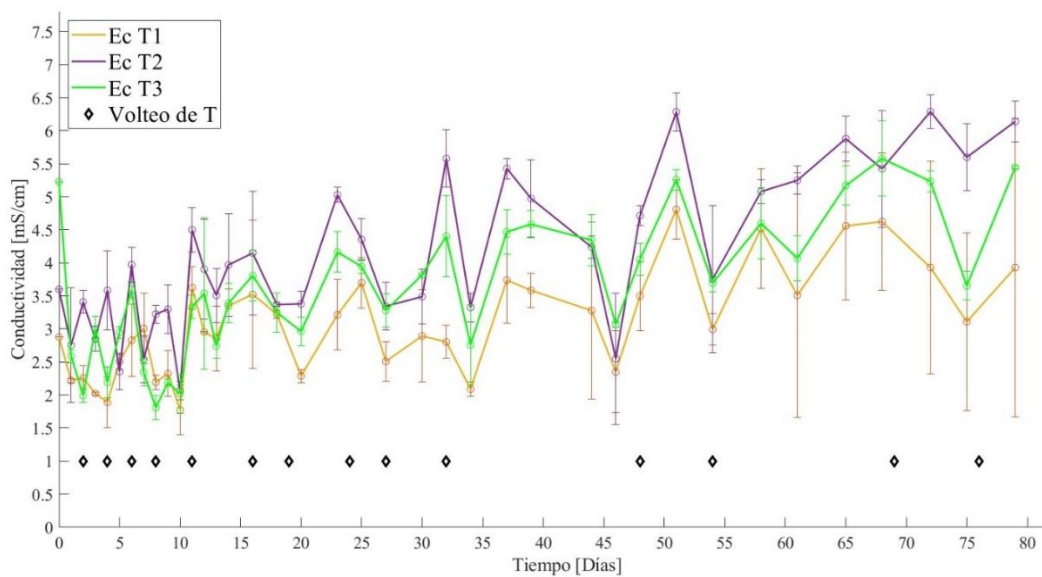
En la fase de maduración, los tratamientos T2 y T3 mostraron una menor fluctuación en los niveles de pH, este comportamiento puede atribuirse a que los procesos de nitrificación no fueron lo suficientemente activos en esta etapa para generar cambios significativos (Cáceres et al., 2006, 2016). Por otro lado, el valor de pH reportado de T1 se debe a la formación de compuestos húmicos, los cuales actúan como sustancias con capacidad tampón del pH (Márquez Bueno et al., 2008). Después del día 48 se observaron diferencias significativas para T1 respecto a los demás tratamientos ( $p < 0.005$ ). Este comportamiento final confirma que las dinámicas del pH a lo largo del proceso están estrechamente relacionadas con la evolución microbiológica y la transformación de los materiales, reflejando la transición hacia un compost estable como en el caso de T1.

**Conductividad eléctrica**

La CE está influenciada principalmente por la naturaleza y composición del material de partida, fundamentalmente por la concentración de sales y, en menor medida, por la presencia de iones como amonio o nitrato formados durante el proceso (Sánchez-Monedero et al., 2001). La Figura 6 muestra el comportamiento de los tratamientos a través del tiempo.

**Figura 6**

*Perfil de conductividad eléctrica del compostaje*



Los valores iniciales para T1, T2 y T3 fueron respectivamente 2.88 mS/cm, 3.6 mS/cm y 5.23 mS/cm. T2 y T3 presentan valores más elevados que T1 y se atribuyen a la mayor cantidad de sales solubles presentes en estos tratamientos, asociados con su contenido elevado de EP (Park Keumjoo, 2011). Resultados similares fueron reportados por Oviedo-Ocaña et al., (2022) y Arevalo Daniela et al., (2017) quienes evidenciaron un aumento en los valores de CE debido al uso de EP, rico en sales como sodio y calcio.

Se registraron valores máximos alcanzados por T2 marcados durante el proceso, con picos alrededor de los días 20, 35 y 60 con CE entre 5-6 mS/cm. Este comportamiento está relacionado con la liberación de sales debido a la degradación de los materiales ricos en nutrientes como los RA (Oviedo-Ocaña et al., 2019). Con relación a T3, este inicia con valores similares a T1 (3-4 mS/cm) mostrando una tendencia creciente entre 4-6 mS/cm durante el proceso, este incremento en la CE se debe a la concentración de minerales debido a la pérdida de masa durante el compostaje, hecho que también puede ocasionar un aumento en la concentración de nutrientes (Leconte et al., 2009). Por otra parte, aunque T2 presenta un valor elevado de CE final (6.14 mS/cm), resulta más favorable en comparación con los valores reportados por Nkansah John et al., (2022), donde las conductividades eléctricas alcanzaron valores de  $8.42 \pm 0.12$  mS/cm. T1 es el que menor CE presenta al final del proceso (3.93 mS/cm) en comparación con T2 y T3, este resultado sugiere que se obtuvo un tratamiento potencialmente menos fitotóxico.

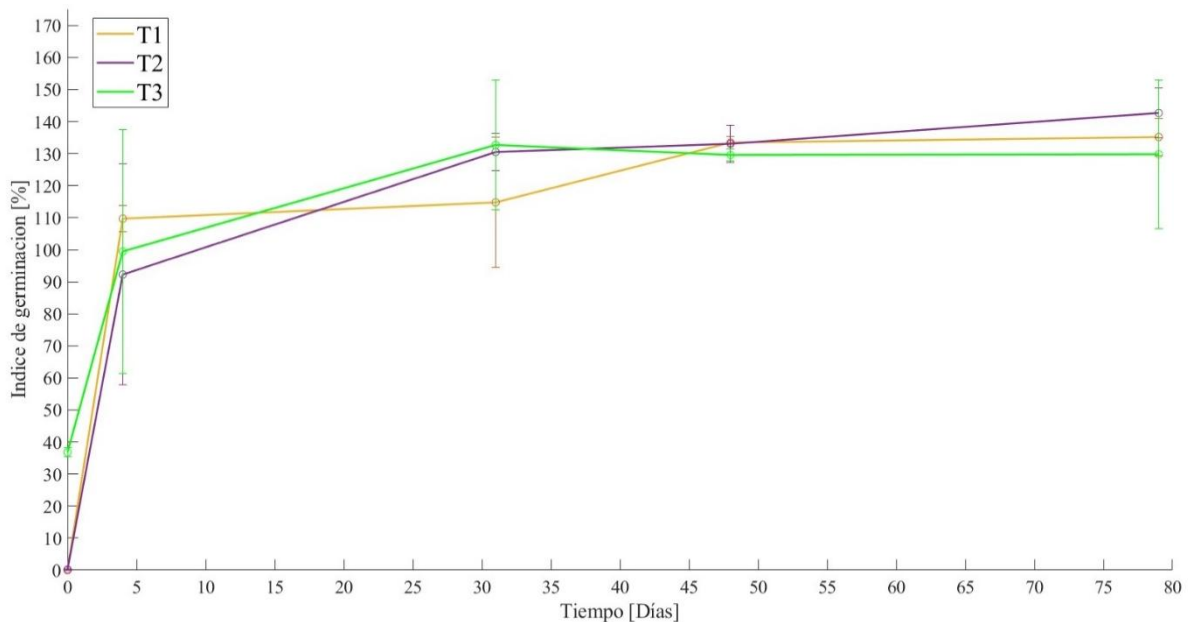
### ***Índice de germinación***

El índice de germinación es un indicador del grado de madurez y fitotoxicidad del compostaje, considerándose maduro cuando alcanza el valor de 80 % o superior (Oviedo-Ocaña et al., 2022; Riffaldi et al., 1986). teniendo en cuenta lo descrito anteriormente el material alcanzó los estándares en términos de fitotoxicidad considerados y descritos en la metodología de Komilis & Tziouvaras., (2009). Los resultados de este indicador se encuentran en la Figura 7. Es importante destacar que todas las muestras tomadas durante las fases de enfriamiento y maduración del proceso de compostaje mostraron una longitud de raíces superior a la registrada en el control, lo que favorece una germinación exitosa de las semillas. La germinación como una prueba indicadora única, podría no ser tan sensitiva a los tóxicos como sería la extensión de las raíces,

razón por la cual se analizó no solo las semillas germinadas sino también su longitud (Acosta Y, 2002).

**Figura 7**

*Perfil de índice de germinación del compostaje*



Los resultados obtenidos al final del proceso en el día 79 fueron 127 %, 142 % y 122 % para T1, T2 y T3 respectivamente, lo que indica que durante el proceso de compostaje disminuyeron las sustancias fitotóxicas que se encontraban presentes al inicio del proceso. Oviedo-Ocaña et al., (2022) encontró resultados similares para tratamientos con contenido de CR con valores mayores a 110 % en IG como en el caso de T1. Para T2 (142 %) se indica una mayor degradación de la materia orgánica y una buena condición ambiental generada por los co-sustratos, un adecuado control de parámetros importantes y el tiempo de transformación, caso similar reportado a lo reportado por Nkansah et al., (2022) una mezcla que contenía EP y RA alcanzó valores adecuados para considerarse seguros ( $IG > 80 \%$ ) a la décima semana del proceso, lo cual

contrasta con los resultados de este estudio, lo que podría atribuirse a un tiempo de transformación más extenso, lo que permitió el desarrollo de sustancias húmicas que favorecen el crecimiento de las plantas al mejorar la disponibilidad de nutrientes (Iglesias Jiménez et al, 1992). En los tratamientos, se descarta la presencia de materiales fitotóxicos y se consideran maduros. Finalmente, los valores obtenidos por los tratamientos durante el compostaje no presentan diferencias significativas ( $p=0.8781$ ), según el análisis estadístico realizado.

### ***Sólidos volátiles***

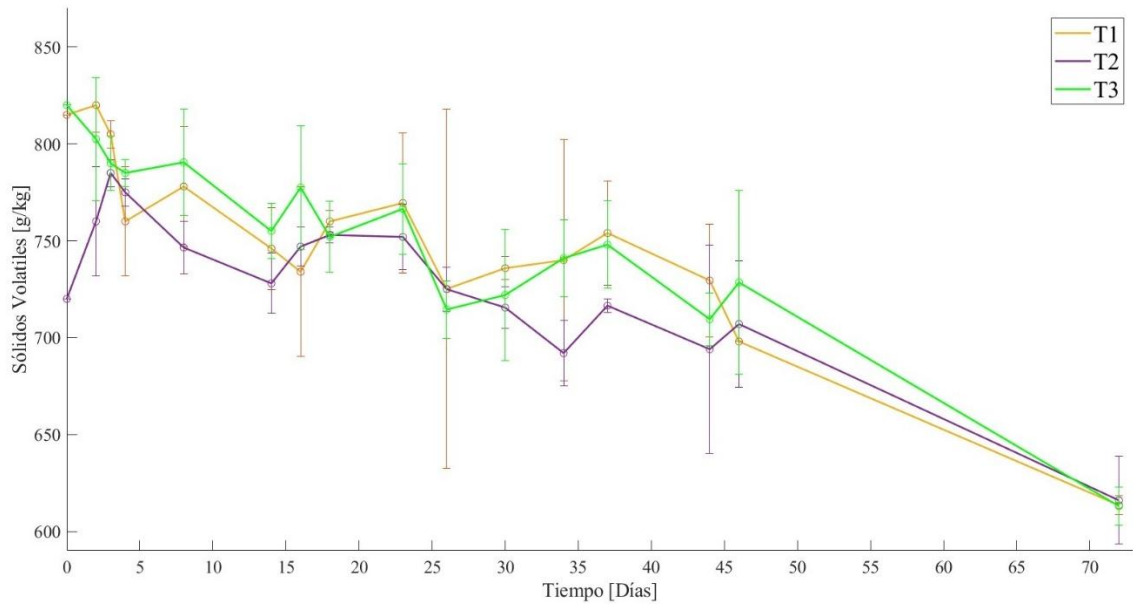
Los sólidos volátiles (SV) constituyen un parámetro clave para evaluar el grado de madurez y la eficacia del proceso (Oviedo-Ocaña et al., 2015). Además, representa un índice que cuantifica la materia orgánica (MO) que se degrada con el tiempo (Soobhany, 2018). En la Figura 8 se observa que, al inicio del proceso, los tratamientos presentaron contenidos elevados de SV: T3 (820 g/kg), T1 (815 g/kg) y T2 (720 g/kg). Durante la fase termofílica, se produjo una importante transformación de la MO que condujo a una reducción de los SV debido a la mineralización de la MO y la pérdida de carbono en forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Concepción et al, 2021). T1 (746 g/kg) y T3 (755 g/kg) ( $p=0.14092$ ) presentaron mayor degradación.

A medida que la MO se descompone, la actividad respiratoria microbiana disminuye, como se evidencia en la Figura 4, donde el descenso de la temperatura refleja una reducción en la actividad biológica (Soobhany, 2018). La mayor pérdida de MO ocurrió durante la fase bio-oxidativa (mesófila, termofílica y de enfriamiento), mientras que en la fase de maduración se registró una menor pérdida, debido a la presencia de compuestos húmicos, que destacan por su resistencia a procesos adicionales de descomposición (concepción María et al., 2021). Resultados similares se reportaron en estudios como Rizzo et al., (2015) y en Gavilanes-Terán et al., (2016)

donde composiciones iniciales que incluían EP y materiales ricos en lignina promovieron una rápida degradación y un mayor contenido de MO inicial.

**Figura 8**

*Perfil de sólidos volátiles del compostaje*



Con respecto a la PA (autocalentamiento de Rottegrade), esta se empleó para evaluar la estabilidad del compost, midiendo la actividad biológica a través de las variaciones térmicas y arrojó que los 3 tratamientos pueden ser clasificados como clase V (compostaje finalizado) puesto que el  $\Delta T$  se encuentra en el rango de 0 °C-10 °C considerándose como un compost estable y maduro (Manu et al., 2017).

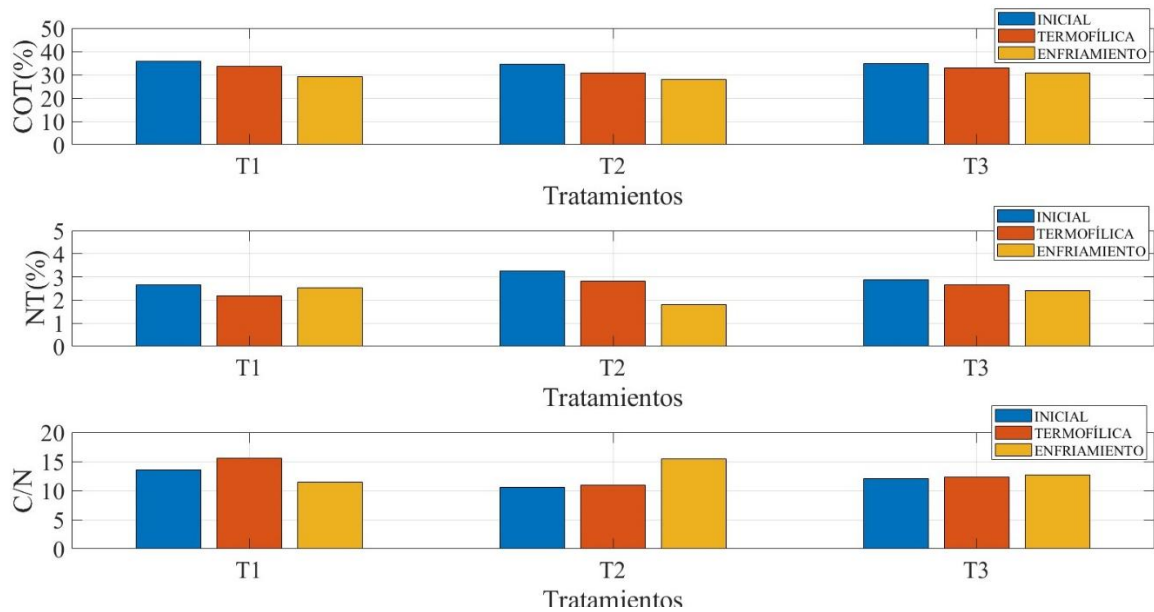
***Contenido de nutrientes***

El carbono orgánico total (COT) de los co-sustratos es consumido por los microorganismos como fuente de alimento para sus actividades metabólicas, lo que resulta en la degradación de la MO (Bello et al., 2023). En la fase inicial del proceso se observan los valores para T1, T2 y T3

con porcentajes de 35.8 %, 34.4 % y 34.9 % respectivamente. La Figura 9 presenta el COT durante el proceso de compostaje.

**Figura 9**

*Resultados de contenido de nutrientes*



Durante la fase termofílica, los tratamientos T1, T2 y T3 registran valores de 33.7 %, 30.7 % y 32.9 % respectivamente, se observa una disminución del contenido COT en todos los tratamientos con respecto a la fase inicial debido a la intensificación de la actividad microbiana, donde los microorganismos descomponen la MO y liberan carbono en forma de CO<sub>2</sub> como subproducto de la respiración, contribuyendo así a la reducción progresiva del COT en la mezcla de compostaje (Ojeda Barón Ludwing, 2022). A su vez, las altas temperaturas generadas por la acción de los microorganismos facilitan la biodegradación de compuestos orgánicos fácilmente degradables, como carbohidratos, lípidos y proteínas, lo que resulta en la degradación de la MO que favorece la mineralización de COT (Bernal et al., 1998).

Finalmente, en la fase de enfriamiento los contenidos de COT continúan disminuyendo hasta alcanzar valores similares de 29.2 %, 28.1 % y 30.7 % respectivamente, gracias a la reducción gradual de la actividad microbiana. Durante esta etapa del proceso se observa que T2 es el tratamiento con contenido más bajo de COT ya que la composición química de los residuos de alimentos contienen altos niveles de compuestos fácilmente biodegradables (Bello et al., 2023), en comparación con T3 que por la naturaleza de los materiales como los estiércoles de ganado o bovinos presentan restos de material vegetal parcialmente digerido, estos contienen lignina y compuestos orgánicos más complejos, los cuales son más resistentes a la degradación microbiana, ocasionando una menor biodegradabilidad inmediata, lo que podría provocar un mayor contenido de COT en este tratamiento (Paredes et al., 2000).

El nitrógeno total (NT) por su parte registrado en T1 mostró una disminución durante la fase termofílica, atribuida principalmente a la volatilización en forma de amoníaco. Según Bernal et al., (2017) el equilibrio que representa la mezcla de materiales ricos en N como los estiércoles, con materiales ricos en carbono, proporciona carbono orgánico degradable que puede ocasionar la inmovilización parcial del N inorgánico lo que disminuye las pérdidas de N por volatilización de  $NH_3$ , respuesta que explica el comportamiento que se observa en T3 durante esta fase (Figura 9).

Posteriormente, al final del proceso, se observó un aumento del NT en T1 como resultado de la degradación de los compuestos orgánicos (Bello et al., 2023). Tal como se muestra en la Figura 5, el incremento del pH no solo estuvo relacionado con la descomposición de ácidos grasos volátiles, sino también con la mineralización del nitrógeno total (Oviedo-Ocaña et al., 2022).

Otro parámetro de gran importancia es la relación C/N, ya que esta determina el tiempo y calidad del compost, además de desempeñar un papel importante en la formulación de equilibrio nutricional (Bello et al., 2023), en la Figura 9 se observa que T2 aumenta su relación C/N, debido a la pérdida de NT presentada. Por otro lado, T1 y T3 mantienen relaciones C/N más estables. Es importante destacar que estos resultados difieren de los reportados por Hwang et al. (2020) en mezclas que contenían EP y EB presentan una disminución de C/N (24.7 a 20.9) al final del proceso. En contraste, las mezclas no experimentaron una disminución en la relación C/N, sino que lograron mantenerla estable, lo que sugiere una mejor capacidad de retención de nutrientes, especialmente en el tratamiento T3.

**5.3 Fase 3: Análisis del efecto de los co-sustratos en la calidad del producto final del co-compostaje de estiércol de pollo.**

**Tabla 6**

*Resultados de los parámetros en el compost final*

Parámetros	T1	T2	T3	NTC5167
Humedad (%)	47±8.4	33.5±2.12	42±11.31	<35
pH	8.71±1.01	9.54±0.01	9.58±0.11	>4-<9
Conductividad (mS/cm)	3.93±2.26	6.14±0.31	5.45±0.02	-
Cenizas(%)	27.3±0.00	43.25±0.64	30.8±1.84	<60
COT (%)	32.05±0.35	26.2±0.71	31.3±0.42	>15
NT (%)	2.24±0.21	2.7±0.17	2.34±0.13	>1
C/N	14.37±1.21	9.73±0.88	13.44±0.95	-
PT (%)	4.56±0.25	6.26±0.51	4.33±0.13	>1

En la Tabla 6, se presentan los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos evaluados en el producto final de los diferentes tratamientos, comparados con los criterios establecidos en la norma NTC5167. El contenido de humedad es uno de los parámetros más importantes en el compostaje, ya que niveles adecuados favorecen una correcta actividad

microbiana (Márquez Bueno et al., 2008). No obstante, en las etapas finales, los valores de humedad deben cumplir con el rango establecido por la normativa vigente. En este estudio los valores obtenidos, con excepción del tratamiento T2, superaron el límite superior permitido por la norma NTC5167 (<35 %), aunque este contenido de humedad elevado representa solo un inconveniente durante la comercialización del producto, no se observan diferencias significativas para los tratamientos ( $p=0.4159$ ).

Respecto al valor del pH, co-sustratos como EP y EB incrementan los niveles hacia valores alcalinos debido a su composición (Leconte et al., 2009; Oviedo-Ocaña et al., 2019, 2022), los tratamientos T2 y T3 no se mantuvieron dentro del rango estipulado por la norma NTC 5167 (>4-9<), siendo T1 el único que se encuentra en este rango (8.71), esto puede ser debido a la adición de CR y su contenido de compuestos ácidos (haciendo que su pH disminuya)(ver Tabla 5), resultados similares fueron encontrados en Oviedo-Ocaña et al., (2022) en donde los tratamientos con EP y CR presentaron valores similares de pH al finalizar el proceso (8.6-8.9). T3 presenta un valor mayor (9.58) debido a la adición de EB. Resultados similares para los tratamientos fueron encontrados en García-Rández et al., (2025) y en Li et al., (2023) para tratamientos que contienen EP y EB con tendencia a pH alcalinos al finalizar el proceso. Los valores finales de pH presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

En relación con la CE, en el producto final se observaron valores elevados, siendo T1 la que menor CE presentó ( $3.93 \pm 2.26$  mS/cm), seguida de T3 ( $5.45 \pm 0.02$  mS/cm) ( $p=0.4159$ ), Estos valores finales se asemejan a los reportados por otros estudios que emplean EP y CR (Oviedo-Ocaña et al., 2022) y los presentados por Nkansah John et al., (2022) para mezclas que contiene EP y EB. De lo anterior se puede concluir que tanto T2 como T3 se encuentran por encima del

límite superior ( $CE > 5 \text{ mS/cm}$ ) propuesto por Gaind & Nain, (2010) debido a que valores mayores podrían inhibir la actividad biológica, lo que podría no ser ideal para aplicar en suelos sensibles o con problemas de salinidad. Por lo tanto, el compost obtenido en estos tratamientos no es recomendado para la aplicación a suelos agrícolas sino como material complementario en la fertilización en macetas. En contraste con T1, el cual cumplió como producto final con resultados más favorables en términos de CE. No se encuentran diferencias significativas en los tratamientos.

En cuanto al contenido de cenizas, este actúa como un indicador de la cantidad de minerales, elementos metálicos entre otros compuestos inorgánicos no biodegradables presentes en el producto final. Los tratamientos T2 y T3 presentaron valores elevados en cenizas ( $43.25 \pm 0.64 \%$  y  $30.8 \pm 1.84 \%$ ) ( $p=0.095089$ ), debido a la pérdida de masa y agua, la cual aumentó las concentraciones de cenizas por la reducción del peso total del material compostado (Oviedo-Ocaña et al., 2019, 2022), sin embargo, todos los tratamientos se encuentran por debajo del límite superior que dicta la norma NTC 5167 ( $<60 \%$ ). Por otra parte, no se presentan diferencias significativas en los tratamientos.

Con respecto al COT, presentó valores para el producto final de  $32.05 \%$ ,  $26.2 \%$  y  $31.03 \%$  para T1, T2 y T3 respectivamente. Según los estándares establecidos por la NTC 5167 todos cumplieron con porcentajes mayores al  $15\%$ . Los resultados obtenidos en el tratamiento T1 fueron similares a los reportados por Oviedo Ocaña et al. (2022). De manera similar en Haroon et al., (2018) indican que el co-compostaje de EP con residuos ricos en lignina, como los residuos vegetales, incrementa los valores finales de este parámetro, teniendo en cuenta el análisis estadístico no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.1017$ ).

T3 presenta niveles altos de COT ( $31.3 \%$ ), en Hwang et al., (2020) se observa que los tratamientos que contienen EP y EB mantienen un nivel alto de COT al final del proceso, gracias

al contenido nutricional de los co-sustratos presentes al inicio del proceso y la aireación creada por materiales de soporte como As, evitando la pérdida excesiva de carbono. Con respecto a T2 se observa una mayor pérdida de carbono a comparación de los demás tratamientos, resultados similares fueron encontrados en Nkansah John et al., (2022) en donde tratamientos con RA y EP disminuían su COT final en comparación con tratamientos de solo RA, debido a la liberación de carbono en forma de dióxido de carbono y la biodisponibilidad de los co-sustratos a ataques microbianos, además de temperaturas más bajas.

En cuanto al nitrógeno total (NT), todos los tratamientos superaron el mínimo establecido por la norma NTC 5167 y muestran mayor contenido que otros estudios (Hwang et al., 2020; Oviedo-Ocaña et al., 2022), debido, probablemente a que la adecuada proporción de los distintos co-sustratos ayudaron a evitar pérdidas en este parámetro. En el caso de T2 se muestra una menor disminución de NT, resultados similares fueron encontrados en Rizzo et al., (2015) en donde la adición de mayores cantidades de EP a co-compostaje de RA ayudaba a inmovilizar el NT debido a la mineralización rápida del nitrógeno que se encuentra en gran cantidad para EP. Se presentaron pérdidas por debajo del 19 % para todos los tratamientos y no se encuentran diferencias significativas en los tratamientos ( $p=0.15612$ ).

La relación carbono nitrógeno, mostró niveles aceptables en T1 y T3 ( $14.37 \pm 1.21$  y  $13.44 \pm 0.95$ ) ( $p=0.15612$ ), atribuibles a la composición inicial, con estiércoles ricos en nitrógeno y co-sustratos que aportaban carbono orgánico fácilmente disponible, evitando así pérdidas excesivas de nitrógeno (Bernal et al., 2017). Gale et al., (2006) establece que los valores menores a 15 en los resultados de compostaje indican estabilidad. En este estudio, todos los tratamientos se encuentran dentro de este rango, cumpliendo con dicho criterio, resultados similares fueron encontrados en

(Rizzo et al., 2015). Por último, la norma NTC 5167 establece que el contenido de PT debe ser por lo menos de 1 %, todos los tratamientos superaron este mínimo, con resultados como los de T2 ( $6.26 \pm 0.51$ ) ( $p=0.15612$ ), Estos hallazgos muestran concentraciones superiores a las reportadas en estudios previos con enfoques similares, como los realizados por (Oviedo-Ocaña et al., 2019, 2022), debido a la adición de materiales de enmienda como la RF al comienzo del proceso. Todos los tratamientos se encuentran entre los rangos establecidos por la norma NTC5167 sin embargo se sugiere disminuir la cantidad de RF o la caracterización previa de los co-sustratos a utilizar para conocer su contenido de PT. Finalmente todos los tratamientos se consideran maduros y seguros.

Con respecto al análisis microbiológico realizado por la UDEA (ver Tabla 7) no se detectan agentes patógenos en el producto final.

**Tabla 7**

*Análisis microbiológico*

<b>Análisis microbiológico</b>			
Tratamientos	Coliformes totales (NMP/g)	Coliformes fecales (NMP/g)	Salmonella /25g
T1	<3	<3	Ausente
T2	<3	<3	Ausente
T3	<3	<3	Ausente

*Nota: Si el resultado es < 3, indica que no se detectaron coliformes en la muestra*

## 6. Conclusiones

El co-sustrato más efectivo para el co-compostaje de estiércol de pollo, son los residuos de cebolla de rama, ya que contribuye al incremento y la prolongación de las temperaturas termofílicas con periodos de 18 días y picos máximos hasta de 59.9 °C. Esto favorece la mineralización de la MO, al tiempo que minimiza las pérdidas de NT y COT, por otra parte, la adición de cebolla de rama a la mezcla de estiércol de pollo ayudó a reducir la CE y el pH característicamente altos de los estiércoles, generando un producto más seguro para el uso agrícola. Sin embargo, no se descarta el uso de otros co-sustratos como el estiércol bovino, debido a que presentan valores temperatura con picos más favorables (62.8 °C) en fases claves como la fase termofílica.

La incorporación de co-sustratos como los residuos de cebolla de rama, los residuos de alimentos, el estiércol bovino y materiales de soporte como el aserrín, ayudaron a reducir el tiempo de compostaje, mejoraron la porosidad de la mezcla y regularon la humedad, al tiempo que elevaron las temperaturas y se sostuvieron durante tiempos prolongados, liberando la mezcla de patógenos microbiológicos como los coliformes totales, fecales y la salmonella. Este efecto se reflejó no solo en el IG, en donde se evidenció que no contienen compuestos fitotóxicos sino además en el análisis microbiológico del producto final, por otra parte, la adición de RF como material de enmienda al inicio proceso demostró aumentar la calidad agrónoma del producto en comparación con estudios previos.

El co-compostaje de estiércol de pollo, con cada una de las mezclas, logró sostener valores nutricionales adecuados según la norma NTC 5167, sin embargo, solo T1 logró conductividades bajas y pH dentro del rango establecido (>4-9<), relaciones C/N elevadas en comparación con

otros estudios, bajas pérdidas de NT, lo cual indica que el producto final obtenido en T1 tiene un potencial valor agrícola.

## 7. Recomendaciones

Se recomienda realizar una caracterización detallada de los nutrientes de los co-sustratos antes del montaje experimental, con el fin de ajustar la relación C/N y evaluar el contenido de fósforo total, para alcanzar los valores adecuados, Así mismo, se sugiere modificar la proporción de los residuos de cebolla de rama y residuos de alimentos en el diseño de mezcla, esto podría contribuir a la disminución de la CE y el pH observado en T3.

Es recomendable disminuir la adición de roca fosfórica al inicio del proceso con el objetivo de evitar un incremento excesivo de fósforo en el producto final. Esto permitirá minimizar interferencias en la absorción de otros nutrientes esenciales, fundamentales para el desarrollo de las plantas. Además, se sugiere investigar el uso de enmiendas alternativas, como el biocarbón, la zeolita y otros materiales potenciales, que contribuyan a mejorar la calidad del compost y la eficiencia en la disponibilidad de nutrientes.

### Referencias Bibliográficas

- Acosta, Y. (2002). *Mineralización del Carbono, Actividad Enzimática y Biomasa Microbiana de un Suelo de la Región Semiárida de Venezuela Enmendado con Residuos Orgánicos*.
- Afanador D. Mayra, & Buitrago P. Luis. (2021). *Análisis de factores que influyen en la contaminación difusa por nutrientes de origen agrícola en una unidad hidrográfica del páramo de Berlín (Santander Colombia)*. [Universidad Industrial de Santander].  
<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/41358>
- Arevalo Sanchez Laura Daniela, & Meneses Ariza Bertha Paola. (2017). *evaluación del proceso de compostaje de residuos de cebolla junca, pollinaza fresca y otros materiales orgánicos*. Universidad Industrial de Santander.
- Bahamón Daniela. (2019). *Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales provenientes de una PTAR del municipio de Sopó Cundinamarca para la producción de un fertilizante organo-mineral*. Fundación Universidad De América.
- Bargougui, L., Guergueb, Z., Chaieb, M., & Mekki, A. (2020). Co-composting of olive industry wastes with poultry manure and evaluation of the obtained compost maturity. *Waste and Biomass Valorization*, 11(11), 6235–6247. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00901-9>
- Bello, H., Ajao, J. O., & Sadiku, N. A. (2023). Co-composting of sawdust with food waste: effects of physical properties on composting process and products quality. *detritus*, 23, 3–15. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2023.17276>
- Bernal, M. P., F'aredes, " C, Sbnchez-Monedero, M. A., & Cegarra, J. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. in *bioresource technology* (vol. 63).

- Bernal, M. P., Sommer, S. G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., & Michel, F. C. (2017). Current approaches and future trends in compost quality criteria for agronomic, environmental, and human health benefits. *Advances in Agronomy*, *144*, 143–233. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.03.002>
- Bian, B., Hu, X., Zhang, S., Lv, C., Yang, Z., Yang, W., & Zhang, L. (2019). Pilot-scale composting of typical multiple agricultural wastes: Parameter optimization and mechanisms. *Bioresource Technology*, *287*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121482>
- Cáceres, R., Coromina, N., Malińska, K., Martínez-Farré, F. X., López, M., Soliva, M., & Marfà, O. (2016). Nitrification during extended co-composting of extreme mixtures of green waste and solid fraction of cattle slurry to obtain growing media. *Waste Management*, *58*, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.014>
- Cáceres, R., Flotats, X., & Marfà, O. (2006). Changes in the chemical and physicochemical properties of the solid fraction of cattle slurry during composting using different aeration strategies. *Waste Management*, *26*(10), 1081–1091. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.06.013>
- Cardona castelblanco susana, & hernández rios leidy johanna. (2008). *aprovechamiento de residuos de podas mediante compostaje en la escuela militar de aviación “marco fidel suárez”*. Universidad Autónoma de Occidente.
- Concepción maría, & cubas santiago. (2021). *efectos del tipo de estiércol en la evolución de su co-compostaje con residuos vegetales y en la calidad agronómica del compost obtenido*. universidad miguel hernandez del elche.

Corponor, Restrepo T. Jorge, Ardila E. Emiliano, & Gualdrón R. Juan. (2008). *Plan integral de manejo del distrito de manejo integrado de los recursos naturales “páramo de Berlín.”*

Dos Santos, F. G., Escosteguy, P. A. V, & Rodrigues, L. B. (2010). *Qualidade de esterco de ave poedeira submetido a dois tipos de tratamentos de compostagem 1.*

Edmar José Kiehl. (2002). *Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto* (tercera).

Fenavi. (2024). *Boletín fenaviquín edición 393 enero 15 de 2024.*

Fondo Nacional Avícola. (2018). *Estabilizador de suelo a partir de gallinaza/pollinaza.*

Gaind, S., & Nain, L. (2010). Exploration of composted cereal waste and poultry manure for soil restoration. *Bioresource Technology*, 101(9), 2996–3003.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.016>

Gale, E. S., Sullivan, D. M., Cogger, C. G., Bary, A. I., Hemphill, D. D., & Myhre, E. A. (2006). Estimating Plant-Available Nitrogen Release from Manures, Composts, and Specialty Products. *Journal of Environmental Quality*, 35(6), 2321–2332.  
<https://doi.org/10.2134/jeq2006.0062>

García-Rández, A., Orden, L., Marks, E. A. N., Andreu-Rodríguez, J., Franco-Luesma, S., Martínez-Sabater, E., Antonio Saéz-Tovar, J., Dolores Pérez-Murcia, M., Agulló, E., Ángeles Bustamante, M., Cháfer, M., & Moral, R. (2025). Monitoring of greenhouse gas emissions and compost quality during olive mill waste co-composting at industrial scale: The effect of N and C sources. *Waste Management*, 193, 33–43.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.11.039>

Gavilanes-Terán, I., Jara-Samaniego, J., Idrovo-Novillo, J., Bustamante, M. A., Moral, R., & Paredes, C. (2016). Windrow composting as horticultural waste management strategy – A

case study in Ecuador. *Waste Management*, 48, 127–134.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.026>

Gurmessa, B., Ashworth, A. J., Yang, Y., Savin, M., Moore, P. A., Ricke, S. C., Corti, G., Pedretti, E. F., & Cocco, S. (2021). Variations in bacterial community structure and antimicrobial resistance gene abundance in cattle manure and poultry litter. *Environmental Research*, 197.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111011>

Haroon, B., Abbasi, A. M., Faridullah, An, P., Pervez, A., & Irshad, M. (2018). Chemical Characterization of Cow Manure and Poultry Manure after Composting with Privet and Cypress Residues. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(22), 2854–2866.  
<https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1546873>

Hernández Angélica. (2017). *Evaluación del proceso de compostaje de pollinaza fresca y otros materiales orgánicos generados en el páramo de Berlín*. Universidad Industrial de Santander.

Hwang, H. Y., Kim, S. H., Kim, M. S., Park, S. J., & Lee, C. H. (2020). Co-composting of chicken manure with organic wastes: characterization of gases emissions and compost quality. *Applied Biological Chemistry*, 63(1). <https://doi.org/10.1186/s13765-019-0483-8>

ICONTEC. (2022). Norma Técnica Colombiana NTC 5167. Productos para la industria agrícola. productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo. *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*.

IDEAM. (2017). *Atlas climatológico de Colombia*.

Iglesias Jiménez, E., & Pérez García, V. (1992). Determination of maturity indices for city refuse composts. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 38(4), 331–343.  
[https://doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90154-4](https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90154-4)

- Ivanović, M., Stefanović, G., Stanković, S., & Milutinović, B. (2024). Co-composting a grape marc: An influence of grape stalks and different biowastes presence on the physical - chemical parameters of the mixture. *Renewable Energy*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120966>
- Komilis, D. P., & Tziouvaras, I. S. (2009). A statistical analysis to assess the maturity and stability of six composts. *Waste Management*, 29(5), 1504–1513. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.10.016>
- Kong, Y., Zhang, J., Zhang, X., Gao, X., Yin, J., Wang, G., Li, J., Li, G., Cui, Z., & Yuan, J. (2024). Applicability and limitation of compost maturity evaluation indicators: A review. *Chemical Engineering Journal*, 489, 151386. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151386>
- Leconte, M. C., Mazzarino, M. J., Satti, P., Iglesias, M. C., & Laos, F. (2009). Co-composting rice hulls and/or sawdust with poultry manure in NE Argentina. *Waste Management*, 29(9), 2446–2453. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.04.006>
- L.F. Diaz, M. de B. W. B. (2007). *Waste management series 8, Compost Science and Technology* (Elsevier).
- Li, J., Liu, S., Xu, Y., Xu, C., Deng, B., Cao, H., & Yuan, Q. (2024). Optimizing biochar addition strategies in combined processes: Comprehensive assessment of earthworm growth, lignocellulose degradation and vermicompost quality. *Bioresource Technology*, 406, 131031. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131031>
- Li, M., Li, S., Meng, Q., Chen, S., Wang, J., Guo, X., Ding, F., & Shi, L. (2023). Feedstock optimization with rice husk chicken manure and mature compost during chicken manure composting: Quality and gaseous emissions. *Bioresource Technology*, 387, 129694. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129694>

- Lopez Wong. (2013). *Estudio del uso de residuos industriales no peligrosos a través del proceso de compostaje y su aplicación para el cultivo de maíz y frijol.*
- Makan, A. (2015). Windrow co-composting of natural casings waste with sheep manure and dead leaves. *Waste Management*, 42, 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.019>
- Manu, M. K., Kumar, R., & Garg, A. (2017). Performance assessment of improved composting system for food waste with varying aeration and use of microbial inoculum. *Bioresource Technology*, 234, 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.023>
- Márquez Bueno, Blanco Díaz, & Cabrera M. J. (2008). *Compostaje: Situación Actual y Perspectivas de Futuro. Factores que afectan al proceso de Compostaje.*
- Nkansah John, Kwarteng Samson, Essandoh Helen, & Kuffuor Richard. (2022). *Enhancing food waste compost quality with nutrient amendments.*
- Ojeda Barón Ludwing, & J. R. F. (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.*
- Orrico, A. C. A., Schwingel, A. W., Costa, M. S. S. de M., Orrico Junior, M. A. P., Borquis, R. R. A., Alves, G. P., de Oliveira, J. D., Leite, B. K. V., Garcia, R. G., & Vilela, R. N. da S. (2020). Characterization and valuing of hatchery waste from the broiler chicken productive chain. *Waste Management*, 105, 520–530. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.029>
- 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., 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>
- 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>
- Paredes, C., Bernal, M., Cegarra, J., & Roig, A. (2000). Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes. *Biology and Fertility. Biology and Fertility of Soils*, *32*(3), 222–227.
- Park Keumjoo. (2011). *Composting of food waste alone and mixed poultry manure inoculated with effective microorganisms 107*.
- 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 (switzerland)*, *15*(9). <https://doi.org/10.3390/su15097437>
- Ravindran, B., Karmegam, N., Awasthi, M. K., Chang, S. W., Selvi, P. K., Balachandar, R., Chinnappan, S., Azelee, N. I. W., & Munuswamy-Ramanujam, G. (2022). Valorization of food waste and poultry manure through co-composting amending saw dust, biochar and mineral salts for value-added compost production. *Bioresource Technology*, *346*, 126442. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126442>

- Rawoteea, S. A., Mudhoo, A., & Kumar, S. (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. in *waste management* (vol. 77, pp. 486–499). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.037>
- Riffaldi, R., Levi-Minzi, R., Pera, A., & De Bertoldi, M. (1986). Evaluation of compost maturity by means of chemical and microbial analyses. *Waste Management & Research*, 4(4), 387–396. <https://doi.org/10.1177/0734242x8600400157>
- Rizzo, P. F., Torre, V. Della, Riera, N. I., Crespo, D., Barrena, R., & Sánchez, A. (2015). Co-composting of poultry manure with other agricultural wastes: process performance and compost horticultural use. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(1), 42–50. <https://doi.org/10.1007/s10163-013-0221-y>
- Roger T. Haug. (2017). *The practical handbook of compost engineering*.
- Román Pilar, Martínez María M., & Pantoja Alberto. (2013). Manual de compostaje del agricultor experiencias en américa latina. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura*.
- Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Paredes, C., & Bernal, M. P. (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technology*, 78(3), 301–308. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00031-1)

- Sanguino Barajas, P. A., Anaya, N. A. T., Escalante Hernández, H., & Cardozo, C. A. V. (2009). Aprovechamiento energético de la biomasa residual del sector avícola. In *43 Revista ION* (Vol. 22, Issue 1).
- Soobhany, N. (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 G., & Meléndez G. (2004). *Cómo medir la calidad de los abonos orgánicos*.
- Soto-Paz, J., Oviedo-Ocaña, R., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L. F., & Manyoma-Velásquez, P. C. (2017). Composting of biowaste: Research trends and relevance in developing countries. *DYNA (Colombia)*, 84(203), 334–342. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.61549>
- Trautmann Nancy, & Krasny Marianne. (1997). *Composting in the classroom scientific inquiry for high school students*.
- Wang, G., Gao, X., Cai, Y., Li, G., Ma, R., & Yuan, J. (2024). Dynamics of antibiotic resistance genes during manure composting: Reduction in herbivores manure and accumulation in carnivores. *Environment International*, 190, 108900. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108900>
- Wang, S., & Zeng, Y. (2018). Ammonia emission mitigation in food waste composting: A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 248, pp. 13–19). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.050>
- Waqas, M., Nizami, A. S., Aburiazaiza, A. S., Barakat, M. A., Rashid, M. I., & Ismail, I. M. I. (2018). Optimizing the process of food waste compost and valorizing its applications: A case

study of Saudi Arabia. *Journal of Cleaner Production*, 176, 426–438.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.165>

Zhan, Y., Chang, S., Chen, Y., Chang, Y., Chen, P., Chen, Y., Zhang, L., Yang, L., Xia, X., Li, J., & Wei, Y. (2024). Effect of auxiliary materials on the formation of humic acid carbon and nitrogen and bacterial dynamics in kitchen waste composting. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(4), 113190. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113190>

Zhang, L., & Sun, X. (2017). Addition of fish pond sediment and rock phosphate enhances the composting of green waste. *Bioresource Technology*, 233, 116–126.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.073>

**Apéndices**

**Apéndice 1**

Cálculo matemático de las relaciones C/N de los co-sustratos seleccionados mediante el uso de la fórmula matemática (Trautmann & Krasny, 1997) (ecuación 1).

$$1. \quad R = \frac{W_1[C_1 \times (100 - M_1)] + W_2[C_2 \times (100 - M_2)] + W_3[C_3 \times (100 - M_3)] + \dots}{W_1[N_1 \times (100 - M_1)] + W_2[N_2 \times (100 - M_2)] + W_3[N_3 \times (100 - M_3)] + \dots}$$

$R_n$  = Relación carbono nitrógeno

$W_n$  = Masa del material (kg)

$C_n$  = Carbono (%)

$N_n$  = Nitrógeno (%)

$M_n$  = Contenido de humedad (%)

A continuación se presentan los cálculos de cada uno de los tratamientos donde:  $R_{T1}$  es la relación C/N para el tratamiento 1,  $R_{T2}$ , es la relación C/N para el tratamiento 2 y  $R_{T3}$ , es la relación C/N para el tratamiento 3

- Tratamiento 1 (T1)

	EP	CR	As
$W_n(Kg)$	24,8	9,2	5,6
$C_n(\%)$	40,5	18,8	45,02
$N_n(\%)$	2,6	1,6	0,3
$M_n(\%)$	74,6	67,5	11,5

$$R_{T1} = \frac{24.8 [40.5(100 - 74.6)] + 9.2[18.8(100 - 67.5)] + 5.6[45.02(100 - 11.5)]}{24.8[2.6(100 - 74.6)] + 9.2[1.6(100 - 67.5)] + 5.6[0.3(100 - 11.5)]}$$

$$R_{T1} = \frac{24.8[1028.7] + 9.2[611] + 5.6[3984.27]}{24.8[66.04] + 9.2[52] + 5.6[26.55]}$$

$$R_{T1} = \frac{53444.87}{2264.87}$$

$$R_{T1} = 23.60$$

- Tratamiento 2 (T2)

	EP	RA	As
$W_n(Kg)$	26,8	8,8	4
$C_n(\%)$	40,5	42,06	45,02
$N_n(\%)$	2,6	1,03	0,3
$M_n(\%)$	74,6	78	11,5

$$R_{T2} = \frac{26.8 [40.5(100 - 74.6)] + 8.8[42.06(100 - 78)] + 4[45.02(100 - 11.5)]}{26.8[2.6(100 - 74.6)] + 8.8[1.03(100 - 78)] + 4[0.3(100 - 11.5)]}$$

$$R_{T2} = \frac{26.8[1028.7] + 8.8[925.32] + 4[3984.27]}{26.8[66.04] + 8.8[22.66] + 4[26.55]}$$

$$R_{T2} = \frac{51649.06}{2075.48}$$

$$R_{T2} = 24.89$$

- Tratamiento 3 (T3)

	EP	EB	As
$W_n(Kg)$	26	7,6	6
$C_n(\%)$	40,5	39,4	45,02
$N_n(\%)$	2,6	5,54	0,3
$M_n(\%)$	74,6	63,48	11,5

$$R_{T3} = \frac{26 [40.5(100 - 74.6)] + 7.6[39.4(100 - 63.48)] + 6[45.02(100 - 11.5)]}{26[2.6(100 - 74.6)] + 7.6[2.54(100 - 63.48)] + 6[0.3(100 - 11.5)]}$$

$$R_{T3} = \frac{26[1028.7] + 7.6[1438.89] + 6[3984.27]}{26[66.04] + 7.6[92.76] + 6[26.55]}$$

$$R_{T3} = \frac{61587.38}{2581.32}$$

$$R_{T3} = 23.86$$