



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD INGENIERIA

CARRERA DE AGROINDUSTRIA

Estudio comparativo del proceso de compostaje tradicional y mediante lombrices californianas (*Eisenia foetida*) en la degradación de residuos urbanos

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Agroindustrial.

Autor:

Velarde Pintag, Mishell Alexandra

Tutor:

Ing. Diana Estefanía Yáñez Sevilla. Ph.D

Riobamba, Ecuador. 2025

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Mishell Alexandra Velarde Pintag, con cédula de ciudadanía 0604483024, autora del trabajo de investigación titulado: Estudio comparativo del proceso de compostaje tradicional y mediante lombrices californianas (*Eisenia foetida*) en la degradación de residuos urbanos. certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, a los 30 días del mes de junio del 2025.



Mishell Alexandra Velarde Pintag
C.I:0604483024

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Mishell Alexandra Velarde Pintag catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería de Agroindustria por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: Estudio comparativo del proceso de compostaje tradicional y mediante lombrices californianas (*Eisenia foetida*) en la degradación de residuos urbanos bajo la autoría de Mishell Alexandra Velarde Pintag; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 30 días del mes de junio de 2025



Diana Estefanía Yáñez Sevilla


C.I:1721969978

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

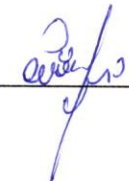
Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación Estudio comparativo del proceso de compostaje tradicional y mediante lombrices californianas (*Eisenia foetida*) en la degradación de residuos urbanos, presentado por Mishell Alexandra Velarde Pintag, con cédula de identidad número 0604483024, bajo la tutoría de Dra. Diana Estefanía Yáñez Sevilla; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 05 de diciembre de 2025


Davinia Sánchez, PhD.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



José Miranda, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Víctor Valverde, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





CERTIFICACIÓN

Que, **VELARDE PINTAG MISHELL ALEXANDRA** con CC: **060448302-4**, estudiante de la Carrera **AGROINDUSTRIA** Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " Estudio comparativo del proceso de compostaje tradicional y mediante lombrices californianas (*Eisenia foetida*) en la degradación de residuos urbanos, cumple con el 9% similitud y 3% de similitud posibles generados por IA, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 19 de noviembre de 2025



Firmado electrónicamente por:
DIANA ESTEFANIA
YANEZ SEVILLA

Validar únicamente con FIRMADIC

Ing. Diana Yáñez Sevilla, Ph.D.
TUTORA

DEDICATORIA

Con profunda gratitud y admiración, dedico este trabajo a:

Dios, por ser mi guía en cada paso de este camino, dándome fortaleza y sabiduría para superar los retos.

Mi familia, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios, especialmente a mis padres, quienes siempre han creído en mí y han sido mi mayor inspiración.

Mis amigos y compañeros, por compartir conmigo experiencias inolvidables y su respaldo en los momentos difíciles.

Mis tutores y maestros, por su guía, paciencia y enseñanzas que enriquecieron no solo este proyecto, sino también mi vida profesional y personal.

A todos ustedes, gracias por ser parte fundamental de este logro.

AGRADECIMIENTO

Primeramente agradezco infinitamente a mi familia el apoyo incondicional y el motivo más grande de haber iniciado este camino de conocimiento, por su dedicación y paciencia a lo largo de estos años, a la Universidad Nacional de Chimborazo por haberme abierto las puertas para un sin fin de conocimientos y oportunidades de ser personas de ciencia con vocación, darnos integridad como personas, acogernos como nuestra alma materna para seguir en este camino de la investigación, a los diferentes docentes que brindaron sus conocimientos y su apoyo motivándonos a superarnos a no caer en el camino, surgir como correctos profesionales y seguir adelante día a día. Agradezco también a mi asesora de tesis, la Ing. Diana Yánez, PhD. por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también haberme tenido toda la paciencia del mundo para guiarme durante todo el desarrollo de mi tesis y convertirse en mi docente y amiga.

Agradezco a todos los que fueron mis compañeros de clase durante todos los niveles de Universidad y al compañerismo, amistad y apoyo moral que han aportado para mi durante la travesía de la carrera.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	14
1.1. Antecedentes	14
1.2. Problema	15
1.3. Justificación	15
1.4. Objetivos.....	16
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.	17
2.1. MARCO REFERENCIAL.....	17
2.2. MARCO CONCEPTUAL	20
2.2.1. Residuos sólidos	20
2.2.2. Clasificación de los residuos sólidos	20
2.2.3. Compostaje.....	22
2.2.4. Vermicompostaje:.....	27
2.2.5. Monitoreo y control del compostaje y vermicompostaje	30
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	31
3.1. Tipo de Investigación	31
3.2. Diseño de la Investigación.....	31
3.3. Técnicas de recolección de Datos	34
3.3.1. Determinación de la relación C/N	34
3.3.2. Control de temperatura, humedad, pH.....	35
3.3.3. Análisis físicos –químicos del compost y vermicompost.....	36
3.4. Procesamiento de datos.	40

3.5. Análisis de datos.	40
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1. Relación C/N.....	42
4.2. Monitoreo y control del compostaje y vermicompostaje.	44
4.2.1. pH	44
4.2.2. Temperatura	45
4.2.3. Humedad	46
4.3. Análisis fisicoquímico del compost y vermicompost.....	48
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	54
5.1. CONCLUSIONES	54
5.2. RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	56
ANEXOS.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Parámetros establecidos para los diferentes tratamientos.....	30
Tabla 2	Residuos representativos del mercado San Alfonso.....	31
Tabla 3	Composición fisicoquímica de los residuos orgánicos.	34
Tabla 4	Concentraciones para la preparación de estándares para fósforo.....	38
Tabla 5	Concentraciones para la preparación de estándares para potasio.....	39
Tabla 6	Composición fisicoquímica de los residuos orgánicos.	42
Tabla 7	Contenido de carbono y nitrógeno en 1 kg de residuos.....	43
Tabla 8	Porcentajes de los residuos orgánicos.	43
Tabla 9	Elementos y nutrientes en el vermicompost	48
Tabla 10	Elementos y nutrientes del compost.	48
Tabla 11	Comparación de parámetros físico-químicos entre compost tradicional y vermicompost con las directrices americanas y europeas.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Recolección de los residuos orgánicos presentes en el mercado San Alfonso	31
Figura 2	Preparación del área y conformación de las pilas de compostaje	33
Figura 3	Monitoreo y control de los parámetros	35
Figura 4	Perfil de pH del vermicompostaje y compostaje	44
Figura 5	Perfil evolutivo de la temperatura en el vermicompostaje y compostaje.....	45
Figura 6	Perfil de humedad en el vermicompostaje y compostaje.	47

RESUMEN

La acumulación de residuos agrícolas y de mercado constituye un desafío ambiental prioritario en Riobamba, donde la falta de alternativas sostenibles limita el aprovechamiento de estos desechos. Entre las técnicas disponibles, el compostaje y el vermicompostaje se perfilan como estrategias viables para transformar los residuos en abonos orgánicos. En este contexto la presente investigación tuvo como propósito comparar ambos procesos a fin de determinar cual resulta más eficiente en la degradación de residuos orgánicos. Para ello, se emplearon tallos de maíz, desechos de frutas y hortalizas, complementados con estiércol bovino, ajustando la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) a 26,95 mediante la ecuación de Tchobanoglus. El estudio se desarrolló en la parroquia Yaruquies, en el barrio el Shuyo, allí se trabajó con un diseño experimental de dos tratamientos con tres repeticiones cada uno y un sustrato inicial de 90 kg por pila. Durante tres meses se monitorearon la temperatura humedad y pH. Además, en ambos tratamientos se realizaron análisis físico-químicos para determinar materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, conductividad eléctrica y estabilidad del pH. Los resultados mostraron que el vermicompostaje con *Eisenia foetida* se mantuvo en condiciones mesofílicas estables (20–25 °C) y con humedad de (70–80 %), mientras que el compostaje tradicional alcanzó temperaturas termofílicas de hasta 55 °C y presentó mayor variabilidad en la humedad (45–60 %). Asimismo, se observó un incremento significativo en nitrógeno total, carbono orgánico y calcio en el vermicompostaje respecto al compostaje. Además, se comparó los resultados físico-químicos del compost y vermicompost con los rangos técnico-normativos establecidos por el *Council of the European Union* (Regulation EU No. 2019/1009) y el *US Composting Council* (USCC) y se observó que varios parámetros se ubicaron próximos a los límites mínimos de referencia.

Palabras claves: degradación, vermicompostaje, abono orgánico, gestión ambiental, sostenibilidad.

ABSTRACT

The accumulation of agricultural and market waste is a priority environmental challenge in Riobamba, where the lack of sustainable alternatives limits its utilization. Among available techniques, composting and vermicomposting are emerging as viable strategies for converting waste into organic fertilizers. In this context, the present research compared both processes to determine which is more efficient at degrading organic waste. Corn stalks and fruit-and-vegetable residues supplemented with bovine manure were used, adjusting the carbon-to-nitrogen (C:N) ratio to 26.95 using the Tchobanoglous equation. The study was conducted in the Yaruquíes parish (El Shuyo neighborhood) under an experimental design with two treatments, each with three replicates, and an initial substrate of 90 kg per pile. Key parameters—temperature, moisture, and pH—were monitored for three months. In addition, physicochemical analyses were performed in both treatments to determine organic matter, total nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, electrical conductivity, and pH. The results showed that vermicomposting with *Eisenia "fetida"* remained under stable mesophilic conditions (20–25 °C) with a moisture content of 70–80%, while traditional composting reached thermophilic temperatures of up to 55 °C and exhibited greater variability in moisture (45–60%). A higher content of total nitrogen, organic carbon, and calcium was also observed in the vermicompost compared with the compost. Furthermore, the physicochemical results of the compost and vermicompost were compared with the technical and regulatory ranges established by the Council of the European Union (Regulation (EU) 2019/1009) and the US Composting Council (USCC), and several parameters were found to be close to the minimum reference limits.

Keywords: degradation, vermicomposting, organic fertilizer, environmental management, sustainability.



Mario Nicolas Salazar
Ramos



Revised by
Mario N. Salazar
0604069781

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El manejo de residuos orgánicos es hoy un reto central de la gestión municipal de residuos. A nivel global, la fracción orgánica (alimentos y poda) constituye alrededor del 44 % de los residuos municipales; en países de ingreso bajo y medio supera el 50 %, mientras que en países de alto ingreso ronda el 32 % (Silpa et al., 2018).

En Ecuador, cada habitante urbano genera en promedio 0,9 kg/hab·día y en 2023 se recolectaron 14 421 t/día de residuos a nivel nacional 84,2 % sin separación y 15,8 % diferenciados (INEC, 2024). Diversas sistematizaciones oficiales señalan que aprox. el 60 % de los residuos generados en el país corresponde a fracción orgánica, lo que refuerza la urgencia de su aprovechamiento (MAATE-Proyecto GRECI, 2022).

En el contexto local, Riobamba genera 220 t/día de residuos; en los mercados municipales el 60 % corresponde a orgánicos, que son trasladados a la planta de compostaje de Porlón (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba, 2025). Estos datos muestran lo importante que es analizar opciones para aprovechar la fracción orgánica de los residuos dentro del cantón.

En este contexto, tanto el compostaje tradicional como el vermicompostaje se han posicionado como alternativas viables para obtener abonos orgánicos. No obstante, todavía es necesario estudiar con mayor profundidad su rendimiento y qué tan adecuados resultan en diferentes condiciones locales.

El compostaje tradicional consiste en un proceso aeróbico en el que los microorganismos transforman la materia orgánica, siempre que exista un control adecuado de la humedad, la temperatura y la aireación. Estudios como el de Iannotti et al. (1993) destacan que esta técnica puede reducir significativamente el volumen de los residuos, mejorar la estructura del suelo y disminuir impactos ambientales. A pesar de ello, también presenta ciertas limitaciones como requerir períodos largos de degradación Villar et al. (2016) y la necesidad de manejo constante para evitar que se generen zonas anaeróbicas (Bernal et al., 2009).

Por otro lado, el vermicompostaje, una técnica de compostaje que utiliza lombrices rojas californianas (*Eisenia foetida*), ha surgido como una alternativa eficiente y sostenible (Edwards & Arancon, 2022). Este proceso combina la acción de microorganismos y lombrices, para transformar los residuos en humus, un abono de alta calidad (V. Villegas & Laines, 2017). Estos microorganismos desempeñan un papel esencial en la descomposición inicial de la materia orgánica, favoreciendo la mineralización de compuestos complejos y el aumento de nutrientes disponibles en el sustrato (V. Villegas & Laines, 2017) De acuerdo con Su et al. (2015), esta técnica es más rápida que el compostaje tradicional y produce un abono con mayor concentración de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio.

En conjunto, ambos métodos permiten comparar cómo se comportan los residuos orgánicos durante el proceso de degradación de los residuos orgánicos y sobre el compost obtenido es por eso que este estudio pretende generar información que ayude a mejorar las prácticas locales de manejo de residuos orgánicos en el cantón Riobamba e impulse el uso de abonos naturales dentro de la producción agrícola.

1.2. Problema

La gestión inadecuada de los residuos orgánicos constituye un problema ambiental y sanitario relevante en Ecuador, donde se generan alrededor de 375 000 toneladas de residuos sólidos al año, de las cuales cerca del 57 % corresponden a materia orgánica (Rodríguez & Baca, 2022). La disposición de estos desechos en botaderos o rellenos sanitarios genera efectos negativos como la proliferación de plagas, malos olores y emisión de gases de efecto invernadero, afectando la calidad ambiental y la salud de la población (Ministerio del ambiente Agua y Transición Ecológica, 2017).

Por lo tanto, los procesos biológicos que ayudan a transformar los residuos como el compostaje y el vermicompostaje son alternativas ecológicas y sustentables para el aprovechamiento de los residuos orgánicos sin embargo, dependen de factores como la relación carbono/nitrógeno (C/N), la temperatura, la humedad y el pH, que influyen directamente en la calidad del producto final.

Es por eso que resulta adecuado la comparación del compostaje tradicional con el vermicompostaje, ya que ayuda a identificar la variación de los diferentes procesos y qué diferencias se presentan en las características físico-químicas del compost y del vermicompost obtenidos.

1.3. Justificación

La gestión adecuada de los residuos orgánicos es un desafío creciente tanto a nivel global como local. En Riobamba cada día se generan alrededor de 220 toneladas de residuos sólidos, de las cuales cerca del 60% proviene de los residuos orgánicos en los mercados municipales (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba, 2025).

En los mercados de la ciudad de Riobamba se generan diariamente entre 8 y 10 toneladas de residuos, una cantidad considerable que se suma al volumen total de desechos urbanos (Ecuadorescucha, 2024). Cuando no existen métodos adecuados para manejarlos, estos residuos terminan ocasionando problemas ambientales, como la contaminación del suelo y del agua, la emisión de gases de efecto invernadero y el aumento de plagas y vectores (Román, 2013).

Por esta razón, el compostaje y el vermicompostaje se presentan como alternativas sostenibles, ya que permiten aprovechar la fracción orgánica de los desechos y disminuir el impacto ambiental asociado a su disposición final (Román, 2013). Diversos estudios demuestran que el vermicompostaje mejora la tasa de descomposición y promueve una

mayor estabilidad del material orgánico debido a la interacción entre microorganismos y lombrices (Edwards & Arancon, 2022; Vi. Villegas & Laines, 2017).

Por ello, la presente investigación se orienta a comparar dos métodos biológicos de aprovechamiento de residuos orgánicos compostaje tradicional y vermicompostaje con el propósito de determinar su desempeño en la transformación de los desechos generados en el mercado San Alfonso de Riobamba.

1.4. Objetivos

1.4.1 General

Estudiar el proceso de compostaje mediante lombrices californianas (*Eisenia foetida*) en comparación con el compostaje tradicional en la degradación de residuos orgánicos.

1.4.2. Específicos

- Determinar la proporción de materia orgánica adecuada para el proceso de compostaje.
- Monitorear el proceso de descomposición de residuos orgánicos en función a temperatura, humedad, pH, en la producción del compost.
- Determinar la calidad del compost producido por compostaje tradicional y bioaumentación de lombrices californianas a través de los análisis físico-químicos.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1. MARCO REFERENCIAL

En su estudio Moubareck et al. (2023) recopilaron estudios que fomentan el reciclaje de materia orgánica a través de diversos tratamientos de residuos agrícolas, enfrentando problemas como la lenta descomposición de la lignocelulosa, la generación de gases nocivos, y la presencia de patógenos, huevos de insectos y semillas indeseadas que afectan la calidad del compost. es por eso que los autores recomiendan emplear agentes microbianos, biológicos, químicos, disolventes, métodos mecánicos y aditivos, además también señalan que variables como la temperatura, humedad, aireación, pH y relación C/N son factores claves que interfieren en el desarrollo del proceso de compostaje donde se recomiendan triturar el material previo al compostaje, ajustar la humedad desde el inicio, mantener una proporción adecuada de C/N, incorporar microorganismos beneficiosos y, durante la etapa de enfriamiento, añadir lombrices ya que ayudan a mejorar la calidad del abono obtenido.

En su estudio Pradas (2020) destaca que el vermicompostaje es una alternativa más eficaz frente al compostaje ya que en el vermicompostaje se integra a las lombrices y microorganismos, logrando un abono final de mayor calidad según el autor, la interacción entre ambos agentes biológicos favorece tanto la descomposición de los residuos orgánicos y al desarrollo de microbiota beneficiosa, lo que acelera y mejora el proceso de descomposición.

Villar et al. (2016) investigaron cómo influye la presencia de lombrices de tierra en la dinámica microbiana durante el vermicompostaje de lodos municipales frescos y compostados donde evaluaron la actividad microbiana a través de análisis químicos como ácidos grasos de fosfolípidos y la medición de actividades enzimáticas durante un periodo de 112 donde se compararon los lodos frescos tratados con lombrices y otros sin lombrices dando como resultado que la actividad microbiana, tanto en bacterias Gram positivas (como *Bacillus* y *Streptomyces*), Gram negativas (como *Pseudomonas* y *Enterobacter*), así como en grupos de hongos disminuyeron en los lodos tratados con lombrices así como la reducción en las actividades enzimáticas relacionadas con la celulasa y la fosfatasa alcalina.

Villegas & Laines (2017) destacan que el vermicompostaje permite transformar los residuos orgánicos en un producto estable y de alta calidad porque este proceso se basa en la acción conjunta de lombrices y microorganismos, lo que genera un abono, capaz de mejorar la fertilidad y recuperar suelos degradados, además analiza distintas especies de lombrices y resalta su capacidad para adaptarse a los residuos, digerir y procesar la materia orgánica y reproducirse con facilidad de las que analizo, solo algunas como *Eisenia andrei*, *Eisenia foetida*, *Dendrobaena veneta*, *Perionyx excavatus* y *Eudrilus eugeniae* se utilizan comúnmente en vermicompostaje por su eficacia para convertir los desechos orgánicos en humus y que la actividad física de las lombrices como la aireación, homogenización y trituración de los residuos agrícolas o agroindustriales, facilita un proceso de descomposición más eficiente.

El trabajo llevado a cabo por Monroy & Prada (2019) evaluaron el aprovechamiento de 6887 kg mensuales de residuos orgánicos generados en el Parque Jaime Duque mediante compostaje. Diseñaron tres pilas con distintas relaciones C/N usando restos de poda, residuos de restaurante y hojas secas, monitoreando temperatura, humedad y pH durante 113 días. En el estudio, únicamente una de las pilas logró alcanzar un nivel adecuado de descomposición; aun así, el compost obtenido no cumplió con los requisitos de la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 (2004) debido a sus bajos contenidos de nutrientes. Los autores subrayan que un buen control de la humedad, la aireación y el tamaño de las partículas del material es fundamental para conseguir un compost estable y con valor nutritivo.

Oñate (2023) analizó el proceso de vermicompostaje utilizando residuos orgánicos mezclados con estiércol de cuy, para lo cual determinó previamente la relación carbono/nitrógeno con el fin de establecer las proporciones adecuadas en cada tratamiento. Se controlaron variables como temperatura, humedad y aireación durante el proceso. Los resultados mostraron una degradación efectiva de la materia orgánica, con pH ligeramente alcalino, aumento de la conductividad eléctrica y una relación C/N final menor a 20, lo que evidenció un adecuado grado de madurez del vermicompost. De los tratamientos aplicados, el primero presentó mejores condiciones de estabilización.

Investigando la eficiencia del compostaje, Zhang et al. (2023) incorporó inoculantes microbianos y observó su efecto en la degradación de la materia orgánica y en la disponibilidad del fósforo donde emplearon residuos agrícolas principalmente paja de maíz y coliflor y se introdujeron cepas de *Bacillus*, *Saccharomyces* y *Trichoderma* donde evidenciaron que la adición de estos microorganismos favoreció la descomposición, alcanzando un incremento del 81,7 % en la degradación del carbono orgánico disuelto y se observó mayor estabilidad térmica tanto en la materia orgánica como en el fósforo, lo que confirma que la actividad microbiana contribuye a acelerar la madurez del compost.

Pan et al. (2024) revisaron diversos estudios centrados en el uso de aditivos basados en hierro dentro del proceso de compostaje. Entre los materiales analizados se incluyeron hierro de valencia cero, óxidos de hierro y sales férricas y ferrosas, los cuales demostraron capacidad para mejorar la degradación, optimizar la calidad del compost y contribuir a la inmovilización de metales pesados además destacaron la reducción de genes de resistencia a antibióticos y la mejora en la formación y estabilidad del humus los autores concluyeron que la efectividad de estos compuestos depende en gran medida de factores como la temperatura, el pH, las características del sustrato y la capacidad de adsorción durante el proceso de compostaje.

Camacho et al. (2018) trabajaron con un inóculo conocido como “microorganismos de montaña” (MM), compuestos de hongos, bacterias y actinomicetos y los introdujeron en los lodos digeridos provenientes de biodigestores (LDBIO) que corresponden a los sólidos sedimentados después de la digestión anaeróbica, con el fin de evaluar su aporte a la

estabilidad y valor nutritivo del compost final donde destacaron que la calidad del compost dependen de los materiales empleados y a los microorganismos presentes durante su elaboración.

Castillo (2020) trabajó con una mezcla de cuatro tipos de residuos orgánicos estiércol bovino, estiércol ovino, residuos de mercado y restos de cosecha donde aplicó tres dosis distintas de microorganismos eficaces activados (EM) para llevar a cabo su experimento conformó 12 composteras y realizó un seguimiento continuo de parámetros como la temperatura, el pH, la humedad y la conductividad eléctrica al finalizar el experimento evidenciaron que la mayoría de las variables evaluadas incluídas la humedad, el pH, la conductividad eléctrica, la materia orgánica, el nitrógeno total, el fósforo, el potasio, el calcio, el magnesio, el cobre, la relación C/N, el cromo y el plomo se ubicaron dentro de los rangos establecidos por la Norma Técnica Chilena pero los resultados de las concentraciones de cadmio y zinc superaron los límites permitidos, registrando valores superiores a 1 ppm.

En el estudio Arrigoni (2016) identificó aspectos de diseño en compostadores y de la gestión del proceso, que faciliten la optimización e implementación de esta tecnología agropecuaria y ambiental, en las alternativas municipales de gestión de residuos. En este trabajo se confirmó la viabilidad de procesos de compostaje descentralizados de pequeña escala, con el cumplimiento de estándares de saneamiento y la estabilización de los materiales compostados, en relación a parámetros tales como: la temperatura, el carbono fácilmente degradable, la respiración microbiana y otros indicadores de estabilidad.

Arízaga et al. (2023) indicó que los residuos orgánicos representan uno de los principales desafíos ambientales, y que el compostaje es una alternativa efectiva para transformarlos en fertilizantes, evitando su disposición inadecuada en rellenos sanitarios es por eso que los autores desarrollaron un sistema automatizado de compostaje que permitió la reducción de la temporalidad del experimento del compost a 94 días, utilizando residuos orgánicos generados en un mercado municipal este sistema automatizado utilizó una placa Arduino para el monitoreo y control automático de la temperatura y la humedad, lo que facilitó mantener condiciones estables durante la descomposición de los residuos orgánicos dando como resultado un compost de calidad ya que cumplió con los estándares establecidos por la FAO y con los requisitos de la Norma Técnica Ecuatoriana para abonos orgánicos.

Vargas et al. (2019) desarrollaron un proceso sistematizado para la elaboración de abono orgánico utilizando residuos de frutas y hortalizas en la planta de compostaje de la Municipalidad de Comas. Para la conformación de las pilas de compost, se utilizaron aproximadamente 290 kg de hortalizas, 72,8 kg de frutas y 156 kg de estiércol. Además, se incorporaron insumos adicionales que favorecieron la degradación de la materia orgánica, tales como 5 kg de chancaca, 100 g de levadura y 2,5 kg de cal disueltos en 50 litros de agua. Durante el proceso se monitorearon variables fisicoquímicas, registrándose una temperatura máxima de 65 °C que descendió progresivamente hasta 29 °C. El pH varió entre 5,8 y 7,5 y la humedad se redujo del 56,57 % al 36,55 %. Al finalizar el compostaje, el abono obtenido mostró mejoras significativas en su composición nutricional, alcanzando niveles de

nitrógeno (N) del 1,92 %, fósforo (P_2O_5) del 1,92 % y potasio (K_2O) del 3,19 %, con un pH de 7,04 y un contenido de materia orgánica del 32,32 %, superando la calidad de los abonos comúnmente producidos en dicha planta.

Alarcon et al. (2019) realizó un bioabono empleando microorganismos derivados del compostaje como *Streptomyces sp*, *Lactobacillus sp.*, y *Aspergillus niger* con dos tipos de compostaje uno en paca digestora y otro en residuos localizados en invernaderos se establecieron seis pilas, tres con un caldo microbial de rizósfera y tres con bioabono microbial además seis pilas adicionales se mantuvieron como control, sin ninguna adición los resultados evidenciaron una disminución en el tiempo para completar el compostaje en ambos tipos de tratamiento pero comparando el mejor rendimiento se obtuvo en el grupo que recibió el inóculo microbiano, ya que este permitió conservar niveles adecuados de temperatura y humedad durante un periodo más prolongado, favoreciendo la descomposición de los residuos orgánicos.

Bustanza & Gomero (2023) plantearon seis tratamientos con tres repeticiones cada uno un tratamiento control compuesto únicamente por pulpa y otros que incorporaban combinaciones con ceniza, estiércol de cuy e inóculo de microorganismos de montaña en diferentes proporciones conformaron pilas de aproximadamente 2 m² las cuales fueron monitoreadas semanalmente durante tres meses, registrándose los valores de pH y temperatura, al finalizar el proceso se evaluaron parámetros de calidad, entre ellos el pH, la conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, nitrógeno, potasio (K_2O), fósforo (P_2O_5), óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO) dando como resultado que la combinación de ceniza con estiércol de cuy elevó significativamente los niveles de CaO y MgO , lo cual incrementó el pH y la conductividad eléctrica y que el uso exclusivo de estiércol de cuy mejoró principalmente los niveles de materia orgánica, nitrógeno y potasio.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. Residuos sólidos

Se consideran residuos sólidos a aquellos materiales o sustancias, usualmente en estado sólido, que son descartados tras su uso o consumo en diversos ámbitos, como hogares, industrias, comercios o instituciones. Esta categoría abarca tanto los desechos derivados de actividades cotidianas como los generados en la limpieza de espacios públicos, incluyendo los restos de poda y jardinería, todos ellos destinados a ser recolectados por los servicios de aseo urbano (Monroy & Prada, 2019).

2.2.2. Clasificación de los residuos sólidos

Los residuos sólidos se clasifican en diversas categorías según su origen y características.

- **Residuo aprovechable**

Es cualquier material, objeto, sustancia o elemento sólido que no posee valor de uso para quien lo genere, pero que es apto para su aprovechamiento y reincorporación a un

proceso productivo (Monroy & Prada, 2019), estos residuos representan una oportunidad para reducir la cantidad de desechos enviados a rellenos sanitarios y disminuir la extracción de recursos naturales, favoreciendo así la economía circular y la sostenibilidad ambiental.

- **Residuos sólidos orgánicos**

Son aquellos residuos que provienen de restos de productos de origen orgánico, la mayoría de ellos son biodegradables. Se pueden desintegrar o degradar rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica. Ejemplo: los restos de comida, frutas y verduras, carne, huevos, etcétera, o pueden tener un tiempo de degradación más lento, como el cartón y el papel. Se exceptúa de estas propiedades al plástico, porque a pesar de tener su origen en un compuesto orgánico, posee una estructura molecular más complicada (Monroy & Prada, 2019).

- **Residuos Peligrosos**

Es aquel residuo o desecho que, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radioactivas pueden causar riesgo a la salud humana y al ambiente. Así mismo se considera residuo o desecho peligroso los envases, empaques o embalajes que hayan estado en contacto con ellos (Monroy & Prada, 2019).

- **Residuos sólidos urbanos**

Son aquellos generados en las áreas urbanas y representan un desafío para la sociedad cuando su volumen crece hasta invadir espacios habitables o recreativos (Oteng et al., 2018). Estos residuos abarcan tanto los desechos generados en los hogares, comercios, industrias y servicios, como aquellos que provienen de las labores de limpieza de calles, parques y áreas verdes (Silpa et al., 2018). De acuerdo con su procedencia y características, pueden clasificarse en residuos domiciliarios originados en actividades domésticas, residuos voluminosos del hogar como muebles o materiales de embalaje, residuos comerciales asociados a actividades empresariales y los residuos provenientes de la limpieza y mantenimiento de espacios públicos, entre ellos calles y zonas verdes (Román, 2013).

- **Residuos agropecuarios**

Los residuos agropecuarios son principalmente de origen orgánico y comparten características con otros residuos agroindustriales y con la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FAO, 2014). La diferencia principal es que los residuos agropecuarios se generan en su entorno natural, mientras que los agroindustriales provienen de la transformación de productos agrícolas, y los urbanos se producen durante el consumo (SAGARPA, 2015). Dentro de los residuos agropecuarios se incluyen los residuos agrícolas, forestales, ganaderos y de industrias agropecuarias (SAGARPA, 2015). Aunque su origen y composición varíen, estos residuos pueden ser reutilizados, recuperados o reciclados. Sin embargo, para implementar sistemas efectivos de gestión, es fundamental contar con conciencia social, voluntad política, marcos legales adecuados y tecnología apropiada. Aunque los recursos económicos son importantes, no deben ser un obstáculo para lograr una gestión que proteja el medio ambiente y la salud pública (Román, 2013).

2.2.3. Compostaje

El compostaje es un proceso biológico controlado mediante el cual la materia orgánica se transforma en un producto estable y rico en nutrientes gracias a la acción de microorganismos aerobios (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2019). Según Martínez & Martínez (2023), este proceso permite aprovechar residuos vegetales, agrícolas y pecuarios para obtener un abono natural que mejora la estructura y fertilidad del suelo. Además, Bernal et al. (2009) destacan que la incorporación de enmiendas minerales como calizas o fosfatos naturales equilibra la relación carbono/nitrógeno y mejora la madurez del compost obtenido.

Este proceso biológico se lleva a cabo en presencia de oxígeno, y bajo condiciones controladas, cuyo objetivo es replicar y mejorar la descomposición natural de la materia orgánica, tal como sucede en los ecosistemas cuando las plantas y los animales completan su ciclo de vida (Román, 2013). Durante este proceso, los residuos orgánicos son transformados gracias a la acción combinada de diversos microorganismos como bacterias, hongos, levaduras y actinomicetos junto con pequeños animales detritívoros, entre ellos insectos y ácaros (Bernal et al., 2009). Estos organismos utilizan el carbono y el nitrógeno presentes en los restos para su crecimiento, liberando simultáneamente calor, dióxido de carbono, agua y nutrientes que son esenciales para las plantas. (Monroy & Prada, 2019).

Para que el compostaje sea efectivo, es fundamental mantener condiciones adecuadas de oxígeno, humedad y temperatura, ya que esto estimula la actividad microbiana (Bernal et al., 2009). Cuando la temperatura alcanza niveles termófilos, se eliminan patógenos y semillas de malezas, garantizando que el material se higienice correctamente (Haug, 2018a). A lo largo del proceso, la materia orgánica se descompone y estabiliza, dando como resultado un producto final conocido como compost, este material es homogéneo y rico en humus, y posee propiedades físicas y químicas que mejoran tanto la fertilidad como la estructura del suelo, contribuyendo además a cerrar los ciclos naturales de nutrientes (Docampo, 2013).

2.2.3.1. Fases del compostaje

El compostaje se puede interpretar como el conjunto de procesos metabólicos complejos que realizan diferentes microorganismos en presencia de oxígeno. Estos organismos aprovechan el nitrógeno y el carbono presentes en la materia orgánica para crecer y reproducirse, generando a la vez calor y transformando el material inicial en un sustrato sólido más estable, conocido como compost, que contiene menos carbono y nitrógeno que la materia original (Román, 2013).

Durante la descomposición, la liberación de calor se refleja en las variaciones de temperatura que ocurren a lo largo del tiempo. Según estas fluctuaciones térmicas, el proceso de compostaje se divide en tres etapas principales, además de una fase de maduración cuya duración puede variar. Estas fases, definidas por la temperatura alcanzada, permiten evaluar el progreso del proceso y la calidad del producto final (Román, 2013).

- **Fase mesófila**

El proceso de compostaje inicia cuando el sustrato orgánico se prepara y se coloca en pilas a temperatura ambiente. El material inicial del compostaje comienza a temperatura ambiente y, en cuestión de días, la temperatura puede elevarse hasta alrededor de 40 °C. Este incremento térmico se debe a la intensa actividad microbiana, ya que durante esta etapa los microorganismos consumen las fuentes más simples de carbono y nitrógeno, generando calor como resultado de su metabolismo. Además, la descomposición de compuestos solubles, como los azúcares, da lugar a la formación de ácidos orgánicos, lo que puede provocar una disminución temporal del pH del material (Román, 2013).

- **Fase termófila**

Cuando supera los 45 °C, los microorganismos mesófilos son reemplazados por bacterias termófilas, capaces de degradar compuestos más complejos como la celulosa y la lignina. Esta fase, conocida como etapa termófila o exotérmica, puede durar varias semanas o incluso más de un mes, dependiendo de las características del sustrato, la tecnología empleada y las condiciones ambientales (Román, 2013).

Durante esta etapa, el nitrógeno se transforma en amoníaco, lo que provoca un aumento del pH. Además, las altas temperaturas, que idealmente deben superar los 55°C, permiten la eliminación de microorganismos patógenos, semillas de malezas, quistes y huevos de helmintos, garantizando la sanitización del compost (Docampo, 2013).

- **Fase de maduración**

La temperatura del compost disminuye progresivamente hasta igualar la temperatura ambiental, lo que ocurre cuando se han agotado las fuentes de carbono y nitrógeno disponibles. Durante esta fase, los microorganismos mesófilos retoman su actividad, y el pH del material desciende ligeramente, acercándose a niveles alcalinos (Docampo, 2013).

2.2.3.2. Técnicas de compostaje

- **Sistemas abiertos o Pila**

El compostaje es un proceso biológico esencial que transforma la materia orgánica en un producto estabilizado y enriquecido con nutrientes, conocido como compost (Román, 2013; Tortosa, 2018b). Este proceso ocurre bajo condiciones aerobias y temperaturas elevadas que favorecen la actividad de microorganismos descomponedores (Moral et al., 2009). El sistema de compostaje en pila abierta se distingue por su operación sencilla y por requerir una inversión relativamente baja, razones por las cuales se ha convertido en una de las técnicas más empleadas para el tratamiento de residuos orgánicos, tanto agrícolas como urbanos (Bohórquez et al., 2015; Villar et al., 2016).

Este método se basa en la conformación de pilas de material orgánico en un espacio adecuado, las cuales deben voltearse de manera periódica con el fin de mejorar la aireación y favorecer un proceso de descomposición más rápido (Haug, 2018c). Durante la fase

termofílica, la temperatura puede alcanzar valores entre 40 °C y 65 °C, lo que promueve una rápida degradación y la eliminación de patógenos (Bohórquez et al., 2015).

Dado que las pilas permanecen expuestas al ambiente, son susceptibles a las condiciones climáticas, tales como la precipitación y fluctuaciones de la temperatura ambiente. En consecuencia, el control de la humedad, que idealmente debe mantenerse entre el 50% y 70%, es un factor crítico para el desarrollo microbiano (Carr, 2019; Moral et al., 2009). A pesar de sus ventajas en términos de costos de inversión y operación, es pertinente reconocer que estos sistemas pueden requerir una mayor extensión de terreno y, si no se gestionan adecuadamente, existe el potencial de generar emisiones odoríferas o atraer vectores (Román, 2013).

- **En contenedores**

Se caracteriza por el uso de recipientes específicos que facilitan el manejo y control del proceso, especialmente en espacios reducidos como áreas urbanas o jardines domésticos (Bernal et al., 2009) porque permite regular variables como la temperatura, la humedad y la aireación, lo cual ayuda a obtener un compost de mejor calidad en un tiempo más reducido (Haug, 2018a), además disminuye la presencia de olores y la proliferación de plagas, diversas investigaciones afirman que trabajar bajo condiciones controladas, el compostaje en contenedores puede convertirse en una alternativa eficiente y accesible para el manejo de residuos orgánicos (Román, 2013).

- **En zanja**

Se excava una fosa o trinchera en el suelo que se llena con material orgánico y se cubre con tierra. Aunque es un método más lento debido a que la descomposición ocurre bajo condiciones menos controladas, aprovecha la actividad biológica natural del suelo para degradar la materia orgánica, es importante mantener la humedad adecuada para favorecer la actividad microbiana y acelerar el proceso (Arenas, 2017; Román, 2013).

2.2.3.3. Factores que intervienen en el compostaje

- **Relación Carbono-Nitrógeno (C/N)**

La relación Carbono-Nitrógeno es un parámetro fundamental para la efectividad del proceso de compostaje, ya que indica el equilibrio necesario entre los materiales que aportan carbono y nitrógeno en la mezcla (Bernal et al., 2009). Los sustratos secos, como hojas y paja, son ricos en carbono, mientras que los frescos, como restos de cocina o césped, aportan nitrógeno (Román, 2013). Para un proceso óptimo, la relación inicial debe estar entre 25 y 30 partes de carbono por cada parte de nitrógeno 25/1, lo que favorece el crecimiento microbiano y la actividad metabólica necesaria para la descomposición (Román, 2013; Tortosa, 2018b). Durante el compostaje, parte del carbono se utiliza para obtener energía, liberándose en forma de CO₂, mientras que el resto se incorpora a la biomasa microbiana junto con el nitrógeno, que es esencial para la síntesis de proteínas. A medida que el compost

madura la relación C:N disminuye cerca de un tercio de su valor inicial, reflejando la estabilización del material (Docampo, 2013; Tortosa, 2018b).

Es importante mantener esta relación dentro de rangos adecuados ya que una C/N demasiado baja indica exceso de nitrógeno, lo que puede causar pérdida en forma de amoníaco, olores desagradables y temperaturas muy altas, mientras que una relación demasiado alta implica escasez de nitrógeno, ralentizando la descomposición y provocando inmovilización del nitrógeno (Román, 2013).

- **Oxígeno**

El compostaje es un proceso biológico en el que diversos microorganismos descomponen la MO en presencia de oxígeno, liberando dióxido de carbono, agua y calor. Este oxígeno es fundamental para que el proceso funcione correctamente; si no hay suficiente, el compostaje se vuelve anaeróbico, lo que no solo ralentiza la descomposición, sino que también provoca la pérdida de nitrógeno y la emisión de gases con olores desagradables que pueden afectar el ambiente y la calidad del compost final (Román, 2013; Tortosa, 2018b).

Al comenzar el proceso de compostaje, los residuos orgánicos suelen presentar entre un 15 y un 20 % de oxígeno, y las concentraciones de dióxido de carbono permanecen relativamente bajas (Haug, 2018b) a medida que avanza la descomposición de los residuos orgánicos, el oxígeno disminuye gracias al consumo por parte de los microorganismos y por ende al mismo tiempo aumenta la producción de dióxido de carbono si el nivel de oxígeno desciende por debajo del 5 %, el compostaje tiende a volverse anaeróbico, lo que no solo ralentiza la degradación, sino que también provoca olores desagradables y pérdidas de nitrógeno, afectando la calidad del compost final (Bernal et al., 2009). Por eso, mantener niveles de oxígeno por encima del 10 % es clave para que el compostaje sea efectivo y limpio (Román, 2013)

Sin embargo, un exceso de aireación también puede ser contraproducente, ya que provoca una caída de la temperatura y una pérdida excesiva de humedad por evaporación, lo que dificulta la descomposición al deshidratar las células microbianas (Meena et al., 2021).

- **pH**

El nivel de acidez o alcalinidad, medido a través del pH, es un parámetro crucial durante el proceso de compostaje, ya que influye directamente en la actividad microbiana y en la calidad final del compost. Aunque el compostaje puede desarrollarse en un rango amplio de pH (3 a 11), se considera que los valores óptimos para la mezcla inicial se encuentran entre 5,5 y 8,0 (Docampo, 2013). Durante la fase inicial del compostaje, el pH suele disminuir debido a la formación de ácidos orgánicos y dióxido de carbono generados por la degradación de la materia orgánica más fácilmente descomponible. Posteriormente, el pH comienza a aumentar como resultado de la mineralización de compuestos nitrogenados, especialmente la producción de amoníaco derivado de la hidrólisis de proteínas, así como por la aireación de la mezcla (Bohórquez et al., 2015; Román, 2013).

El aumento del pH a valores alcalinos 7 y 8, favorece la estabilidad del compost y ayuda al saneamiento del compost ya que dificulta la supervivencia de microorganismos patógenos sensibles a estas condiciones alcalinas (Román, 2013).

El pH durante el compostaje inicia con valores ácidos que descienden gradualmente por la formación de ácidos orgánicos y luego aumenta a medida que se degradan estos compuestos y se mineralizan, estabilizándose en un rango cercano a la neutralidad o ligeramente alcalino (Docampo, 2013; Román, 2013).

- **Temperatura**

La temperatura de la biomasa durante el compostaje es uno de los parámetros más importantes y comúnmente utilizados para describir la evolución y el estado del proceso, permitiendo un seguimiento sencillo y efectivo (Haug, 2018b). El compostaje inicia a temperatura ambiente y, gracias a la actividad metabólica de los microorganismos, la temperatura puede elevarse hasta aproximadamente 65 °C sin necesidad de aporte externo de calor (Bernal et al., 2009; FAO, 2014).

En resumen, la temperatura es un indicador clave del progreso y la eficiencia del compostaje, reflejando la actividad microbiana y el estado de maduración del material, siendo fundamental para garantizar un compost higienizado y de calidad (Docampo, 2013).

- **Tamaño de partícula**

El tamaño de las partículas de los materiales orgánicos es un factor clave que influye directamente en la actividad microbiana y en la velocidad del proceso de compostaje (Haug, 2018b) se recomienda que las partículas tengan un tamaño entre 5 y 20 centímetros, ya que a medida que avanza la descomposición de los residuos orgánicos, el tamaño de las partículas disminuye debido a la actividad microbiana (Meena et al., 2021).

Las partículas de menor tamaño facilita el acceso de los microorganismos a la materia orgánica y favorece una descomposición más rápida (Villar et al., 2016) Sin embargo, cuando los residuos orgánicos se trituran en exceso, la porosidad de los residuos disminuye, dificultando la circulación del aire dentro de la pila (Docampo, 2013) esta reducción impide el flujo de oxígeno lo que afecta las condiciones aerobias necesarias para el proceso de compostaje, limitando la actividad microbiana y ralentizando de manera significativa la descomposición por lo tanto un adecuado tamaño de las partículas optimizan tanto la aireación como la eficiencia del compostaje (Docampo, 2013; Román, 2013).

- **Humedad**

La humedad en el proceso de compostaje se refiere al contenido de agua presente en la mezcla de materiales orgánicos, expresado generalmente como porcentaje del peso total. Este parámetro es fundamental, ya que el agua actúa como medio indispensable para el transporte de nutrientes y para mantener las condiciones óptimas para la actividad metabólica de los microorganismos descomponedores (Román, 2013) un nivel adecuado de humedad es fundamental para el desarrollo de los microorganismos y para asegurar una

degradación eficiente de la materia orgánica ya que si la humedad es demasiado baja la actividad biológica disminuye y el proceso de compostaje se vuelve más lento y si existe un exceso de agua puede desplazar el oxígeno presente en la mezcla, generando condiciones anaeróbicas que afectan la calidad del compost y producen olores desagradables (Tortosa, 2018a).

La humedad para un compostaje eficiente se encuentra entre el 45 % y el 60 %, aunque este intervalo puede variar según el tipo de residuo y la tecnología utilizada. Por debajo del 30–40 %, la actividad microbiana se reduce de forma notable, mientras que valores superiores al 60 % tienden a compactar el material, dificultando la aireación y favoreciendo procesos anaeróbicos (Román, 2013). Por esta razón, resulta indispensable mantener un seguimiento continuo y regular de la humedad a lo largo de todo el proceso, ya sea mediante la adición de agua o el uso de materiales secos y estructurantes. Asimismo, los volteos periódicos contribuyen a conservar un ambiente aeróbico y equilibrado (Meena et al., 2021).

- **Microorganismos**

Durante el proceso de compostaje, los microorganismos presentes en la materia orgánica se multiplican y desarrollan reacciones bioquímicas que liberan dióxido de carbono, agua, energía y diversos compuestos orgánicos. Parte de la energía generada es utilizada para el metabolismo microbiano, mientras que el excedente se libera en forma de calor (Haug, 2018a). Cuando los microorganismos tienen acceso a sustratos fácilmente degradables, la descomposición es rápida y se produce una significativa generación de calor, lo que caracteriza la fase termofílica del compostaje (Moral et al., 2009; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2019). Sin embargo, a medida que los nutrientes disponibles se agotan, la tasa de crecimiento microbiano disminuye, lo que reduce la producción de calor y ralentiza el proceso de descomposición. En esta etapa, conocida como fase de maduración, la transformación de la materia orgánica continúa, pero a un ritmo más lento, culminando en la formación de humus estable y de calidad (Docampo, 2013; Román, 2013).

2.2.4. Vermicompostaje:

El vermicompostaje es un proceso natural en el que lombrices y microorganismos trabajan juntos para transformar los residuos orgánicos en un abono de alta calidad llamado vermicompost o humus de lombriz (Edwards & Arancon, 2022) sin embargo, los microorganismos llevan a cabo la mayor parte de la descomposición orgánica, las lombrices aceleran el proceso de descomposición al triturar y mezclar los residuos, lo que aumenta la superficie disponible para que los microorganismos actúen y modifica las propiedades físicas, químicas y biológicas del sustrato. Esto hace que la descomposición sea más rápida y el producto final más nutritivo para las plantas (Domínguez & Pérez, 2018).

En el proceso de vermicompostaje las lombrices fragmentan y procesan la materia orgánica ya que al atravesar su sistema digestivo, los residuos orgánicos se homogenizan y se enriquecen con microorganismos beneficiosos presentes en sus excrementos, lo que contribuye a mejorar la calidad compost es por eso que este método es más eficiente que el

compostaje tradicional, pues acelera la degradación de los residuos y produce un abono con menores concentraciones de compuestos tóxicos para las plantas (Domínguez & Pérez, 2018).

El vermicompost se caracteriza por que presenta una baja relación carbono/nitrógeno, indicador de un alto nivel de madurez y estabilidad (Edwards & Arancon, 2022) además, posee una importante capacidad para retener humedad, lo que favorece la absorción del suelo y promueve un mejor desarrollo radicular en las plantas por su aporte de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio en formas fácilmente disponibles mejorando las condiciones para el crecimiento vegetal (Domínguez & Pérez, 2018).

2.2.4.1.Principales especies de lombrices utilizadas en vermicompostaje

Las lombrices aptas para el vermicompostaje se caracterizan por poseer ciertas propiedades biológicas y ecológicas que les permiten colonizar y procesar eficientemente residuos orgánicos (Domínguez & Pérez, 2018). Estas lombrices tienen la capacidad natural de habitar en materiales orgánicos, presentan una alta tasa de consumo, digestión y asimilación de la materia orgánica, y pueden tolerar una amplia variedad de condiciones ambientales, como fluctuaciones en temperatura y humedad (Edwards & Arancon, 2022).

Las especies más empleadas en el vermicompostaje son *Eisenia foetida* y *Eisenia andrei*, debido a su amplia capacidad para colonizar distintos tipos de residuos orgánicos. Son reconocidas por su adaptabilidad a diversos climas, su rápido ciclo reproductivo y su elevada capacidad de consumo, ya que pueden ingerir diariamente una cantidad de materia orgánica similar a su propio peso corporal (Dominguez & Edwards, 2010). Su actividad contribuye a la obtención de un compost enriquecido con nutrientes esenciales —como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio— y con compuestos beneficiosos, entre ellos hormonas de crecimiento y enzimas que mejoran la estructura y fertilidad del suelo (Edwards & Arancon, 2022). En este sentido, la selección de especies con estas características resulta decisiva para optimizar el proceso de vermicompostaje y obtener un fertilizante orgánico de alta calidad que favorezca sistemas agrícolas más sostenibles (Domínguez & Pérez, 2018).

2.2.4.2.Factores que intervienen en el vermicompostaje

- **Microorganismos**

En los procesos de vermicompostaje, participa una amplia comunidad de microorganismos mesófilos, principalmente bacterias, hongos filamentosos y actinomicetos, que desempeñan un papel esencial en la degradación y estabilización de la materia orgánica (Tiquia & Tam, 2002). La interacción entre estos microorganismos y las lombrices es estrecha y mutuamente beneficiosa, ya que los microorganismos constituyen una parte fundamental de la dieta de las lombrices, siendo las bacterias las más abundantes y activas en la descomposición inicial, seguidas por hongos, algas y protozoos (Domínguez & Edwards, 2011).

- **pH**

El pH es un parámetro fundamental en el proceso de vermicompostaje, ya que influye directamente en la actividad biológica de las lombrices y en la calidad del producto final. Durante el vermicompostaje el pH disminuye conforme avanza la descomposición debido a la formación de ácidos orgánicos como los ácidos húmicos y fúlvicos, que acidifican ligeramente el medio (Canchan et al., 2023). Sin embargo, el pH se estabiliza en un rango cercano a la neutralidad o ligeramente alcalino entre 6 y 7,5 lo cual es favorable para la actividad metabólica de las lombrices epígeas y los microorganismos asociados (Román, 2013).

Las lombrices epígeas, como *Eisenia foetida*, muestran preferencia por ambientes con pH moderadamente ácido a neutro, alrededor de 5,0 a 7,5 y evitan condiciones con pH inferiores a 4,5 donde la supervivencia puede verse comprometida. Durante el proceso, las secreciones intestinales de calcio y amonio de las lombrices contribuyen a neutralizar pequeñas acidificaciones, y es común la adición de caliza para mantener el pH en niveles óptimos (Edwards & Arancon, 2022).

- **Temperatura**

La temperatura es un factor crítico para el bienestar y la productividad de las lombrices utilizadas en el vermicompostaje, especialmente de especies como *Eisenia foetida*. El rango óptimo para su actividad y reproducción se sitúa entre 15 y 25 °C, con una temperatura corporal ideal cercana a los 19 °C, dentro de este rango, las lombrices muestran máxima producción de humus y tasa reproductiva. Por encima de los 30 °C, aunque las lombrices pueden resistir, su producción disminuye notablemente y la generación de humus se reduce y por el contrario temperaturas inferiores a 10 °C provocan una marcada reducción en su actividad alimentaria, y por debajo de 4 °C cesa completamente la reproducción y el desarrollo de nuevas lombrices (Domínguez & Pérez, 2018; Edwards & Arancon, 2022).

Para mantener condiciones óptimas, se recomienda ubicar la vermicompostera en lugares frescos y sombreados, evitar la luz solar directa y controlar la humedad para evitar estrés térmico. En climas cálidos, se pueden emplear técnicas como la colocación de geles refrigerantes o botellas de agua congelada para regular la temperatura interna (Meher et al., 2014).

- **Humedad**

La humedad es un factor esencial para el bienestar y la productividad de las lombrices en el proceso de vermicompostaje, ya que estas respiran a través de su piel y requieren un ambiente constantemente húmedo para mantener su actividad metabólica. El rango ideal de humedad en el lecho de vermicompostaje se sitúa entre el 70 % y el 80 %, siendo este nivel el que favorece la reproducción, alimentación y supervivencia óptima de las lombrices (Román, 2013). Por debajo del 70 %, las lombrices entran en una zona de riesgo donde pueden sufrir desecamiento, lo que afecta su salud e incluso puede provocar la muerte por otro lado, humedades superiores al 90 % pueden generar condiciones de saturación que

dificultan la aireación, provocando ahogamiento y reducción de la actividad microbiana (Edwards & Arancon, 2022).

2.2.5. Monitoreo y control del compostaje y vermicompostaje

Tabla 1

Parámetros establecidos para los diferentes tratamientos

Parámetros	compost	vermicompost
Temperatura	T. ambiente	20°-30°
Humedad	50%-60%	70%-80%
pH	4,5 - 8.5	5 – 8,5

Nota. Tomado de “Compostaje y lombricompostaje: Optimización de procesos para la gestión de residuos orgánicos”, por Pottipati et al., 2022.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323857925000150>)

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo de Investigación

La presente investigación posee un enfoque cuantitativo y un diseño experimental, orientado a comparar la eficiencia del compostaje y del vermicompostaje en la degradación de residuos orgánicos procedentes del mercado de San Alfonso. Previo al experimento, se realizó observación de campo y revisión bibliográfica para identificar los residuos representativos del mercado que se utilizó como materias primas. La fase experimental incluyó la conformación de pilas tanto de compostaje como de vermicompostaje utilizando los materiales previamente seleccionados. Durante el proceso se realizó el monitoreo de variables físico-químicas como pH, temperatura y humedad con el fin de observar su comportamiento a lo largo del tiempo (Oñate, 2023).

3.2. Diseño de la Investigación

La investigación se desarrolló en la provincia de Chimborazo, en el cantón Riobamba, parroquia Yaruquies, barrio El Shuyo. El diseño experimental estuvo conformado por dos tratamientos vermicompostaje y compostaje tradicional, cada uno con tres repeticiones, dando como resultado un total de seis pilas experimentales.

La duración del estudio abarcó 90 días, periodo durante los cuales se realizaron muestreos periódicos. Las mediciones de pH, humedad, y temperatura se tomaron cada 2 días en cada pila, registrándose por muestreo 6 observaciones.

Fase 1: Observación y recopilación de residuos orgánicos

Durante tres visitas sistemáticas al mercado san Alfonso de Riobamba, se realizaron observaciones donde se identificó y se anotó los residuos más representativos presentes en el lugar de investigación ver tabla 2.

Tabla 2
Residuos representativos del mercado San Alfonso

Categoría de residuo	Productos representativos	Observación
Frutas	Tomate riñón, guayabas, mango, papayas, fresas	Frutas en descomposición
Hortalizas	Hojas de lechuga, troncos de brócoli, hojas de cebolla	Descarte en las ventas
Legumbres	Vainas de haba, fréjol y arveja	Descarte en las ventas
Residuos de maíz	Hojas	Descarte en las ventas

Figura 1
Recolección de los residuos orgánicos presentes en el mercado San Alfonso



Fase 2: Recolección y preparación de materiales orgánicos

El estiércol bovino y restos de cosecha de maíz, se recolectaron en la parroquia Yaruquies barrio el Shuyo del cantón Riobamba, provincia de Chimborazo. La recolección del estiércol bovino se realizó directamente en el área destinada al manejo del ganado bovino durante 2 días consecutivos, obteniéndose un total de 70 kg. Posteriormente el estiércol fue almacenado en sacos de yute y secado en un lugar fresco sin exposición directa al sol durante 30 días, con el objetivo de estabilizarlo y conservar sus nutrientes.

Fase 3: Identificación y selección de los residuos orgánicos

Se identificó y seleccionó los residuos orgánicos más representativos del mercado, complementados con estiércol vacuno y restos de cosecha de maíz. Para complementar esta información, se realizó una revisión bibliografía con el fin de obtener valores de referencia de los contenidos de carbono y nitrógeno presentes en cada tipo de residuo esta información permitió estimar la relación C/N de las mezclas.

Fase 4: Experimental

Para la implementación del sistema de compostaje se construyó una cubierta protectora con láminas de zinc sostenidas por palos de monte, está cubierta tuvo como propósito proteger las pilas de la radiación solar directa y de la lluvia, garantizando condiciones estables durante el proceso de descomposición posteriormente se establecieron seis (6) pilas de compostaje, cada una con una base de un metro cuadrado (1 m²) y una altura promedio de 0,50 m, la elección de esta altura se basó en consideraciones técnicas y bibliográficas, ya que en los sistemas de vermicompostaje, alturas superiores a 1m generan temperaturas termófilas que afectan la supervivencia de las lombrices (*Eisenia foetida*) por lo que se estandarizó la altura de todas las pilas en 0,50 m en todas las pilas con el fin de asegurar condiciones homogéneas de comparación.

Se realizó una remoción del suelo a una profundidad aproximada de 10 cm para mejorar la aireación de la base y evitar el contacto directo de los residuos orgánicos en descomposición con el suelo por lo que se colocó una capa de hojas secas que funcionó como aislante, los residuos orgánicos fueron triturados y mezclados de manera uniforme y finalmente se incorporaron lombrices californianas (*Eisenia foetida*) en tres de las 6 pilas experimentales, mientras que los 3 restantes se manejaron bajo el método de compostaje tradicional.

Figura 2

Preparación del área y conformación de las pilas de compostaje



Fase 5: Manejo y monitoreo del proceso de compostaje y vermicompostaje.

Durante el proceso de compostaje tradicional y vermicompostaje, la humedad, temperatura y pH de las pilas se monitoreó cada 48 horas utilizando un medidor SMART SENSOR PH-328. En ambos casos, se aplicó un riego inicial durante dos días consecutivos con el objetivo de ajustar la humedad a los niveles de referencia: aproximadamente 80% en vermicompostaje y 60% en compostaje. Posteriormente, el riego se realizó únicamente

cuando el porcentaje de humedad descendía por debajo de los niveles mínimos (70% vermicompostaje y 50% en compostaje).

El riego se realizó mediante una manguera de aspersión manual hasta restituir los valores de referencia establecidos para cada tratamiento. Finalmente, el proceso se dio por concluido cuando se evidenció una mínima presencia de partículas orgánicas sin descomponer en las pilas de compost y vermicompost, así como un olor característico a tierra húmeda, indicador de estabilización del compost y vermicompost. En este punto, se procedió a la recolección de muestras representativas de cada pila para la realización de los análisis físico-químicos correspondientes, con el fin de evaluar la calidad final del compost y del vermicompost obtenido.

3.3. Técnicas de recolección de Datos

Las muestras del compost y vermicompost se tomaron de cada pila a una profundidad aproximada de 5 cm, evitando los bordes superficiales. Se recolectó 5 submuestras por pila, las cuales se homogenizaron para conformar una muestra compuesta representativa de cada tratamiento. Las muestras se colocaron en bolsas plásticas limpias y debidamente etiquetadas, y se transportaron al laboratorio para su posterior análisis físico-químicos.

3.3.1. Determinación de la relación C/N

Para la conformación de las pilas de compostaje y vermicompostaje se utilizaron estiércol bovino, residuos de cosecha y residuos orgánicos de mercado. Los contenidos de Carbono- Nitrógeno C/N se obtuvieron mediante revisión bibliográfica.

Para determinar la proporción adecuada de C/N en una mezcla de residuos de maíz, estiércol de vaca y residuos de mercado, se realizó una revisión de la literatura que proporciona la composición fisicoquímica de materia seca, humedad, carbono y nitrógeno de cada uno de los residuos orgánicos. Los resultados se detallan a continuación:

Tabla 3
Composición fisicoquímica de los residuos orgánicos.

Residuos orgánicos	% Materia seca	% humedad	% Carbono	% Nitrógeno
Estiércol de bovino	55	45%	12,43	1,26
Restos de leguminosas	15	85%	0,5	1,1
Restos de cosecha de maíz	25	75%	14,3	0,22
Restos de frutas	20	80%	11	0,28

Nota. Tabla adaptada de *Desarrollo de una Aplicación para el cálculo de la Relación Carbono-Nitrógeno de una masa compostable* (Busajm,2023), disponible en el repositorio de la Universidad Nacional de Cuyo: https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/18984/busajm-mellado-gonzalo-tesis.pdf.

Con base en los valores bibliográficos del contenido de carbono y nitrógeno presentados en la tabla 3, se realizó una estimación teórica de la masa de carbono y nitrógeno

presentes en cada tipo de residuo orgánico. Para estos cálculos, se estableció como referencia una base de 1 kg en peso húmedo, empleando las ecuaciones correspondientes para la conversión y determinación de los contenidos elementales.

Contenido de agua en cada residuo.

$$Agua = 1kg \times (Contenido\ de\ humedad\ de\ cada\ residuo) \quad Ecuación\ 1$$

Contenido de materia seca en cada residuo.

$$Materia\ seca = 1kg - Agua \quad Ecuación\ 2$$

Contenido de nitrógeno en cada residuo.

$$N = Materia\ seca \times (Contenido\ de\ nitrogeno\ de\ cada\ residuo) \quad Ecuación\ 3$$

Contenido de carbono en cada residuo.

$$C = Materia\ seca \times (Contenido\ de\ carbono\ de\ cada\ residuo) \quad Ecuación\ 4$$

Con estos resultados se procedió a calcular la relación C/N de acuerdo a la ecuación establecida por Tchobanoglus (Monroy & Prada, 2019).

$$\frac{C}{N} = \frac{x(C\ en\ 1kg\ de\ EB) + y(C\ en\ 1\ kg\ RM) + z(C\ en\ 1kg\ de\ RF) + w(C\ en\ 1kg\ de\ RL)}{x(N\ en\ 1kg\ de\ EB) + y(N\ en\ 1\ kg\ RM) + z(N\ en\ 1kg\ de\ RF) + w(N\ en\ 1kg\ de\ RL)} \quad Ecuación\ 5$$

Donde:

x, y, z, w: Cantidad de cada residuo

EB: Estiércol de bovino

RM: Restos de cosecha de maíz

RF: Residuos de frutas

3.3.2. Control de temperatura, humedad, pH

Para el control de los parámetros pH, temperatura y humedad del suelo se utilizó un medidor SMART SENSOR PH-328 que se indica en la figura 2.

La temperatura, humedad y el pH se monitorearon cada 48 horas, a una hora fija de 09:00 midiendo todas las pilas, en cada pila se tomó una lectura aproximada al centro de la pila y se calculó el promedio por tratamiento a partir de las tres pilas de compost y vermicompost.

Figura 3

Monitoreo y control de los parámetros



3.3.3. Análisis físicos –químicos del compost y vermicompost

Los análisis físico- químicos se realizaron al finalizar el proceso de compostaje y de vermicompostaje, una vez que ambos materiales alcanzaron su fase de madurez. En ese punto se constató el predominio de material fino y homogéneo, con escasos restos orgánicos principalmente de los nudos del tallo del maíz y se verificó el color, que en el vermicompost presentó un tono negro característico de un abono estabilizado por la acción de las lombrices, mientras que en el compost sin lombrices predominó un marrón oscuro. Esta diferencia se asoció con un mayor grado de humificación en el vermicompost y marrón oscuro en el caso del compost sin lombrices.

- **pH**

El análisis del pH por este método se realizó al compost y vermicompost, donde se tomaron 5 g de muestra de compost o vermicompost previamente homogenizada. La muestra se colocó en un vaso de precipitación de 50 ml, al cual se adicionaron 40 ml de agua destilada en una proporción 1:8 (p/v), según la metodología descrita por la norma INEN 2 813:2016. La mezcla se agitó manualmente para favorecer la disolución de los compuestos solubles, posteriormente, la suspensión se dejó reposar durante 10 minutos, y el pH se midió directamente en el líquido sobrenadante utilizando un medidor de pH marca Mettler Toledo, modelo Seven Compact pH S230 (Oñate, 2023).

- **Conductividad eléctrica**

Para el análisis de conductividad eléctrica (CE) se pesaron 5 g de muestra previamente tamizada (malla de 2 mm) y se colocaron en un vaso de precipitación de 50 ml. Posteriormente, se adicionaron 40 ml de agua destilada y se agitó la mezcla durante 30 minutos, con el fin de permitir la disolución de los iones solubles presentes en el compost. Finalizado el tiempo de agitación, la muestra se dejó en reposo durante 10 minutos para decantar los sólidos. La medición de la conductividad se realizó en el sobrenadante utilizando un medidor de conductividad marca Mettler Toledo, modelo Seven Compact Conductivity S230 (Oñate, 2023).

- **Materia orgánica**

Para la determinación del contenido de materia orgánica (MO), se utilizó el método de pérdida por ignición (LOI) (Oñate, 2023).

Se tomaron aproximadamente 2 g de muestra seca y molida de cada tratamiento. Las muestras fueron colocadas en cápsulas de porcelana previamente taradas y se introdujeron en una estufa de secado a 105 °C durante 24 horas, con el propósito de eliminar totalmente la humedad residual.

Posteriormente, las cápsulas se retiraron del horno, se dejaron enfriar en un desecador durante 30 minutos y se registró el peso seco (P_1). Luego, las muestras se colocaron en una mufla eléctrica, a una temperatura de 550 °C durante 2 horas, para permitir la oxidación completa de la materia orgánica.

Después del tiempo de calcinación, las cápsulas se enfriaron nuevamente en el desecador hasta alcanzar temperatura ambiente y se registró el peso final (P_2) (Gonzales & Toro, 2024).

Finalmente, el porcentaje de materia orgánica se obtuvo mediante la fórmula:

$$\%MO = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100$$

Ecuación 6

- **Nitrógeno**

La determinación del nitrógeno total se realizó mediante el método Kjeldahl, el cual comprende tres etapas: digestión, destilación y titulación.

Se pesaron 3 g de muestra seca y molida, que fueron colocados en un balón Kjeldahl de 250 ml. Se adicionaron 25 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 , 98%) y 1,5 g de una mezcla catalizadora compuesta por sulfato de potasio (K_2SO_4) y sulfato cúprico ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), con el objetivo de elevar el punto de ebullición y acelerar la digestión.

Las muestras se calentaron gradualmente en un digestor Kjeldahl hasta obtener una solución límpida de color verde-azulado, indicando la completa mineralización del nitrógeno orgánico a sulfato amónico. La digestión se mantuvo durante 3 horas a una temperatura aproximada de 380 °C simultáneamente, se preparó una muestra en blanco utilizando los mismos reactivos, sin añadir muestra, para descartar contaminaciones.

Una vez enfriadas las muestras, el contenido de cada balón se transfirió a un matraz aforado de 250 ml, completando el volumen con agua destilada. Posteriormente, se tomaron 20 ml de la solución digerida y se colocaron en el destilador Kjeldahl, añadiendo 40 ml de NaOH al 50 % para liberar el amoníaco (NH_3).

El amoníaco destilado fue capturado en un matraz Erlenmeyer de 250 ml que contenía 20 ml de HCl 0,1 N y dos gotas del indicador Shiro-Tashiro, que cambia de color según el pH. La destilación se realizó durante 10 minutos.

El amoníaco absorbido en la solución ácida fue valorado mediante titulación con NaOH 0,1 N, determinando el punto final por cambio de color del indicador (Gonzales & Toro, 2024).

Se determinó el contenido de nitrógeno utilizando la siguiente ecuación

$$\%N = \frac{[(V * K)_{HCl} - (V * k)_{NaOH}]M - [(V * K)_{HCl} - (V * k)_{NaOH}]B * N * meqN2 * 100}{P_m}$$

Ecuación 7

Codificación de los parámetros:

- **%N:** Porcentaje de nitrógeno en la muestra.
- **V:** Volumen de ácido (HCl) o base (NaOH) usado en la valoración (ml).
- **K:** Factor de corrección para HCl.

- **k:** Factor de corrección para NaOH.
- **M:** Muestra analizada (volumen o cantidad total tratada).
- **B:** Blanco (volumen de HCl usado en la muestra en blanco, sin nitrógeno).
- **N:** Normalidad del ácido clorhídrico (HCl), en este caso 0.1 N.
- **meqN2:** Equivalente gramo de nitrógeno molecular (N₂) por mililitro (en función del método usado; generalmente es 14.007 si se trata de nitrógeno atómico).
- **P_m:** Peso de la muestra.

• Fósforo

Se prepararon dos soluciones para el análisis: la solución A, que consistió en disolver 60 gramos de amonio en 200 ml de agua destilada, a la cual se añadieron 1,455 gramos de tartrato de antimonio y potasio y 700 ml de ácido sulfúrico; y la solución B, que se elaboró disolviendo 132 gramos de ácido ascórbico en agua, completando el volumen hasta un litro en un balón aforado. Posteriormente, se mezclaron 35 ml de la solución A con 10 ml de la solución B y se ajustó el volumen a un litro con agua destilada para obtener la solución coloreada (Oñate, 2023).

Para el análisis, se tomaron 5 ml de la muestra, que se colocaron en tubos de centrifuga de 50 ml, y se ajustó el pH entre 3 y 3,5 mediante la adición de hidróxido de sodio, completando el volumen hasta 50 ml con agua destilada. Finalmente, para la medición, se mezclaron 5 ml de esta solución con 5 ml de la solución coloreada y 5 ml de los estándares ubicados en la Tabla 4 , y se realizó la lectura en el espectrofotómetro UV-VIS para determinar la concentración del analito (Oñate, 2023).

Tabla 4
Concentraciones para la preparación de estándares para fósforo.

NIVEL	C1 Concentración inicial (ppm)	V1 Valor a tomar de la concentración inicial (ml)	C2 Concentración a la que se quiere llevar (ppm)	V2 Volumen a aforar (ml)	Observaciones
STOCK	1000	0,25	25	100	Nota: se deberá utilizar Agua Ultra pura.
1	25	0,2	0,1	50	
2	25	0,8	0,4	50	
3	25	1,6	0,8	50	
4	25	3	1,5	50	
5	25	4	2	50	

Nota. Tomado de “Tratamiento mediante vermicompostaje de residuos orgánicos generados en el mercado huagra corral en la parroquia izamba, cantón Ambato”, por Oñate, 2023
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21314>

• Potasio

Se efectuó una digestión ácida húmeda para la liberación de los elementos minerales. Se pesaron 2 g de muestra seca y molida, colocándolos en matraces Erlenmeyer de 125 mL. Se añadieron 10 mL de ácido nítrico concentrado (HNO₃ al 65 %) a cada muestra y se mezcló

suavemente para iniciar la digestión. Luego, se incorporaron 10 mL de agua destilada con el fin de facilitar el proceso, las muestras fueron colocadas en una placa de calentamiento a una temperatura controlada entre 80 y 90 °C durante aproximadamente dos horas, evitando que la solución llegara a ebullición, con el propósito de promover la oxidación parcial de la materia orgánica.

Se agregaron 3 ml de peróxido de hidrógeno (H₂O₂ al 30 %) como agente oxidante y se repitió el calentamiento por dos horas adicionales, hasta obtener una solución clara y libre de partículas al finalizar el proceso, las muestras se enfriaron a temperatura ambiente y se filtraron con papel filtro en embudos de vidrio, aforando el filtrado a 50 ml con agua destilada en matraces volumétricos. Se prepararon soluciones patrón de potasio a partir de una solución madre de KCl 1000 mg/L, diluidas en ácido nítrico 1 %, estas soluciones se utilizaron para calibrar el equipo y obtener la curva de calibración correspondiente (Oñate, 2023).

Para la determinación de potasio, se preparó una solución de ácido nítrico al 1 %, la cual se empleó como matriz para la elaboración de los estándares, siguiendo las concentraciones indicadas en la tabla 5. Estas soluciones permitieron calibrar el equipo de medición y garantizar la exactitud de los resultados obtenidos posteriormente (Oñate, 2023).

Tabla 5
Concentraciones para la preparación de estándares para potasio.

NIVEL	C1 Concentración inicial (ppm)	V1 Valor a tomar de la concentración inicial (ml)	C2 Concentración a la que se quiere llevar (ppm)	V2 Volumen a aforar (ml)	Observaciones
STOCK	1000	1	10	100	Aforar cada
1	10	2,5	0,5	50	STD (K) con
2	10	5	1	50	Agua
3	10	10	2	50	Acidulada al
4	10	12,5	2,5	50	1% deHNO ₃
5	10	15	3	50	

Nota. Tomado de “Tratamiento mediante vermicompostaje de residuos orgánicos generados en el mercado Huagra Corral en la parroquia Izamba, cantón Ambato”, por Oñate, 2023 <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21314>

- **Calcio y magnesio**

Se pesó 0,5 gramos de la muestra. A continuación, se añadieron 10 ml de ácido clorhídrico concentrado y la mezcla se calentó hasta alcanzar la ebullición, permitiendo que el líquido se evaporara casi por completo. El residuo resultante se disolvió en 20 ml de ácido clorhídrico 2M, y el extracto obtenido se transfirió a un matraz aforado de 250 ml, completando el volumen con agua destilada (Gonzales & Toro, 2024).

Posteriormente, la solución se mezcló bien y se filtró utilizando papel de filtro, asegurando disponer de suficiente cantidad para los análisis posteriores. De la solución filtrada, se tomó una alícuota de 1 ml, la cual se colocó en un matraz aforado adecuado para realizar una dilución que garantizara una lectura óptima en el espectrofotómetro de absorción atómica (Gonzales & Toro, 2024).

Para minimizar posibles interferencias causadas por aniones presentes en la muestra, se añadió una solución de lantano al 2,5 % p/v, ajustando la mezcla para alcanzar una concentración final aproximada de 0,1 % de lantano. Finalmente, se completó el volumen con agua destilada y se procedió a determinar las concentraciones de calcio y magnesio utilizando la técnica de espectrofotometría de absorción atómica (Gonzales & Toro, 2024)

La determinación de estos parámetros químicos se realizó en el laboratorio SETLAB donde la técnica y método de análisis fue para Nitrógeno total por Volumetría y para los demás parámetros por ICP.

3.4. Procesamiento de datos.

Los datos obtenidos de temperatura, humedad y pH se registraron en cada pila con una frecuencia de 48 horas durante todo el periodo experimental

Cada registro representó una observación por pila, por lo que en cada evento de muestreo se obtuvieron seis datos correspondientes a las seis pilas del estudio. En total se llevaron a cabo 45 eventos de muestreo a lo largo de los 90 días de evaluación, generando un conjunto de 270 mediciones para cada una de las variables monitoreadas.

La información recopilada fue procesada mediante el software Excel con el fin de obtener valores representativos, los datos fueron consolidados mediante el cálculo de promedios para cada tratamiento (compostaje tradicional y vermicompostaje), lo que permitió realizar comparaciones posteriores entre ambos métodos.

Para analizar la calidad del compost, se obtuvieron los resultados de los análisis fisicoquímicos CE, MO, N, P, K, Ca, Mg en el laboratorio. Estos datos fueron ingresados en una hoja de cálculo de Excel para su posterior análisis estadístico posteriormente, la base de datos fue exportada al software estadístico R para su procesamiento.

3.5. Análisis de datos.

El análisis estadístico se realizó utilizando el programa estadístico **R**, versión 4.3.3 (R Core team, 2024). El procedimiento comprendió varias etapas, de acuerdo con los siguientes pasos metodológicos:

Verificación de normalidad:

Se utilizó la prueba de **Shapiro-Wilk** para determinar si los datos de cada tratamiento seguían una distribución normal. Esta prueba fue aplicada individualmente para cada variable y cada tratamiento.

Evaluación de homogeneidad de varianzas:

En caso necesario, se aplicó la prueba F (var.test) para comprobar si existía igualdad de varianzas entre los tratamientos. Esta información fue clave para decidir el tipo de análisis estadístico se debe utilizar.

Comparación de medias:

Para las variables que cumplieron con el supuesto de normalidad, se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes. En todos los casos se utilizó la versión de Welch (var.equal = FALSE), que no asume igualdad de varianzas, lo cual permite un análisis más robusto ante pequeñas diferencias en la varianza.

Visualización de resultados:

Se generaron gráficos de barras con medias y barras de error (error estándar) mediante la librería ggplot2 del software R. Esta visualización permitió observar con claridad el comportamiento de cada variable evaluada según el tratamiento.

Se consideró un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ para la interpretación de los resultados, evaluando los valores p obtenidos y los intervalos de confianza del 95% para cada análisis.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Relación C/N

La revisión de la literatura permitió identificar la composición fisicoquímica de los residuos de maíz, estiércol de vaca y residuos de mercado, particularmente en cuanto a materia seca, humedad, carbono y nitrógeno. Con base en estos datos, se determinó la proporción adecuada de C/N para la mezcla de residuos, cuyos valores se presentan a continuación.

Tabla 6
Composición fisicoquímica de los residuos orgánicos.

Residuos orgánicos	% Materia seca	% humedad	% Carbono	% Nitrógeno
Estiércol de bovino	55	45%	12,43	1,26
Restos de leguminosas	15	85%	0,50	1,10
Restos de cosecha de maíz	25	75%	14,30	0,22
Restos de frutas	20	80%	11,00	0,28

Nota. Elaborado a partir de “Desarrollo de una Aplicación para el cálculo de la Relación Carbono-Nitrógeno de una masa compostable”, por Busajm, 2023. (https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/18984/busajm-mellado-gonzalo-tesis.pdf)

Con base en los datos obtenidos de la tabla 6, se realizó una estimación teórica de la masa de carbono y nitrógeno presentes en cada tipo de residuo orgánico.

Cálculo del Carbono y Nitrógeno de cada residuo utilizado para el compostaje Estiércol de bovino.

$$\begin{aligned} \text{Agua} &= 1\text{kg} * (0,45) = 0,45\text{kg} \\ \text{materia seca} &= 1\text{kg} - 0,45\text{kg} = 0,55\text{kg} \\ N &= 0,55\text{kg} * (0,023) = 0,01265\text{kg} \\ C &= 0,55\text{kg} * (0,226) = 0,1243\text{kg} \end{aligned}$$

Restos de cosecha de maíz

$$\begin{aligned} \text{Agua} &= 1\text{kg} * (0,75) = 0,75\text{kg} \\ \text{materia seca} &= 1\text{kg} - 0,75\text{kg} = 0,25\text{kg} \\ N &= 0,25\text{kg} * (0,009) = 0,00225\text{kg} \\ C &= 0,25\text{kg} * (0,572) = 0,143\text{kg} \end{aligned}$$

Restos de frutas

$$\begin{aligned} \text{Agua} &= 1\text{kg} * (0,80) = 0,80\text{kg} \\ \text{materia seca} &= 1\text{kg} - 0,80\text{kg} = 0,20\text{kg} \\ N &= 0,2\text{kg} * 0,014 = 0,0028\text{kg} \\ C &= 0,2\text{kg} * 0,56 = 0,11\text{kg} \end{aligned}$$

Restos de leguminosas

$$\begin{aligned} \text{Agua} &= 1\text{kg} * (0,85) = 0,85\text{kg} \\ \text{materia seca} &= 1\text{kg} - 0,85\text{kg} = 0,15\text{kg} \end{aligned}$$

$$N = 0,15kg * 0,077 = 0,011kg$$

$$C = 0,15kg * 0,0035 = 0,000539kg$$

Tabla 7
Contenido de carbono y nitrógeno en 1 kg de residuos.

Residuos orgánicos	Carbono (C)	Nitrógeno (N)
Estiércol de bovino	0,1243 kg	0,01265kg
Restos de cosecha de maíz	0,143 kg	0,00225 kg
Restos de frutas	0,110kg	0,00280 kg
Restos de leguminosas	0,000539kg	0,01100 kg

Con los resultados obtenidos se procedió a calcular la relación C/N de acuerdo a la ecuación establecida por Tchobanoglous (Monroy & Prada, 2019).

$$\frac{C}{N} = \frac{x(C \text{ en } 1kg \text{ de EB}) + y(C \text{ en } 1kg \text{ de RM}) + z(C \text{ en } 1kg \text{ de RF}) + w(C \text{ en } 1kg \text{ de RL})}{x(N \text{ en } 1kg \text{ de EB}) + y(N \text{ en } 1kg \text{ de RM}) + z(N \text{ en } 1kg \text{ de RF}) + w(N \text{ en } 1kg \text{ de RL})} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\frac{C}{N} = \frac{10,5kg(0,1243) + 42kg(0,143) + 30kg(0,11) + 7,5kg(0,000539)}{10,5kg(0,01265) + 42kg(0,00225) + 30kg(0,0028) + 7,5kg(0,011)}$$

$$\frac{C}{N} = \frac{1,3051 + 6,006 + 3,3 + 0,00404}{0,13282 + 0,0945 + 0,084 + 0,0825}$$

$$\frac{C}{N} = \frac{10,615}{0,3938}$$

$$\frac{C}{N} = 26,95$$

Donde:

x, y, z, w: Cantidad de cada residuo

EB: Estiércol de bovino

RM: Restos de cosecha de maíz

RF: Residuos de frutas

RL: Restos de leguminosas

Porcentaje de los residuos orgánicos

Con base en la relación establecida C/N, se prepararon las pilas de compostaje, para lo cual se trituraron previamente los residuos orgánicos hasta obtener un tamaño aproximado de 3 cm. Posteriormente, se realizó la mezcla de los materiales. Las pilas fueron conformadas el 10 de noviembre de 2024, incorporando 11,67 % de estiércol de vaca, 46,67 % de rastrojo de maíz, 33,33 % de residuos de fruta y 8,33 % de leguminosas.

Tabla 8
Porcentajes de los residuos orgánicos.

Residuos orgánicos	kg	%
Estiércol bovino	10,5	11,67
Residuos de cosecha de maíz	42	46,67
Residuos de frutas	30	33,33

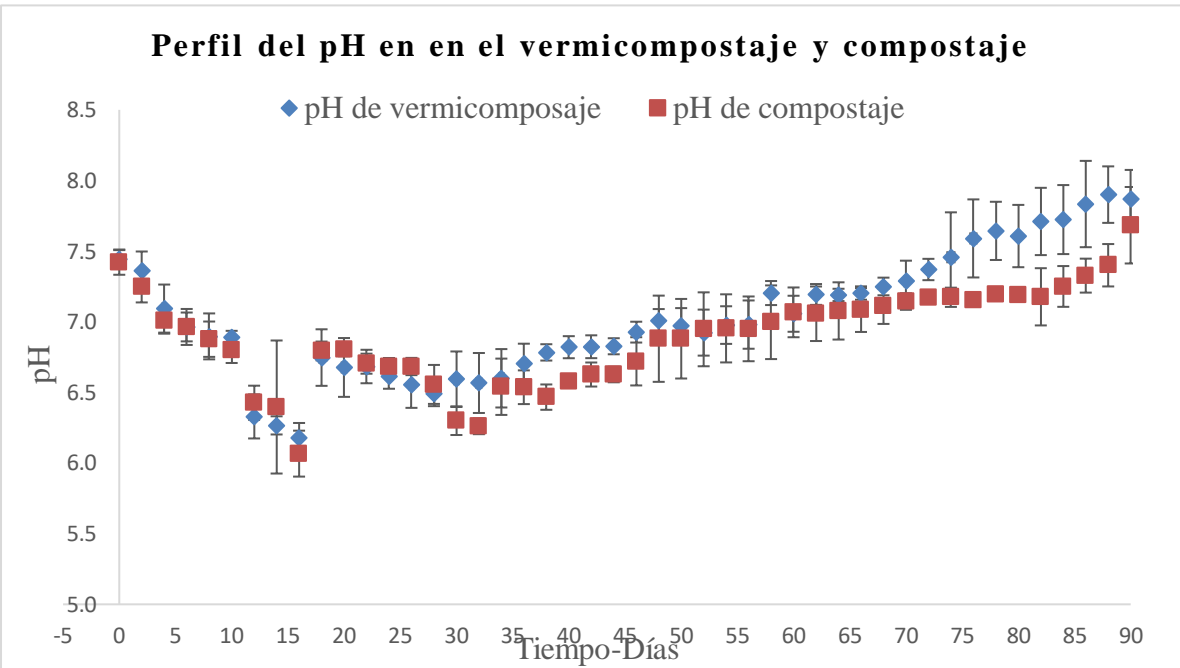
Residuos de leguminosas	7,5	8,33
Total	90	100

4.2. Monitoreo y control del compostaje y vermicompostaje.

4.2.1. pH

El pH es un parámetro fundamental en los procesos de compostaje y vermicompostaje, ya que influye directamente en la actividad microbiana y en la disponibilidad de nutrientes durante la descomposición de la materia orgánica. Al inicio del proceso suele producirse una disminución debido a la formación de ácidos orgánicos, mientras que en etapas posteriores tiende a estabilizarse hacia valores cercanos a la neutralidad, lo cual indica la madurez y estabilidad del compost. Por esta razón, se monitoreó el pH en ambos tratamientos a lo largo de los 90 días de experimentación. En la Figura 3 se presenta el perfil de evolución del pH, que permite comparar las variaciones del compostaje y vermicompostaje.

Figura 4
Perfil de pH del vermicompostaje y compostaje



El comportamiento del pH presentó tres fases diferenciadas durante el proceso de compostaje y vermicompostaje: una disminución inicial, una etapa de relativa estabilidad y un aumento progresivo hacia la neutralidad al final del proceso. Estas variaciones responden a los cambios bioquímicos propios de la degradación de la materia orgánica y al trabajo de los microorganismos y las lombrices en el caso del vermicompostaje.

En la figura 3 se observa que el **pH** de las pilas de compostaje y vermicompostaje presento una ligera **disminución durante los primeros 15 días**, alcanzando valores cercanos a **6,2**. Este descenso se debe a la formación de ácidos orgánicos volátiles producto

de la degradación de carbohidratos y proteínas simples por parte de bacterias mesofílicas (Moral et al., 2009; Román, 2013).

A partir de los **20 días**, los valores de pH comenzaron a **estabilizarse** alrededor de la **neutralidad**, tanto en el **compostaje** como en el **vermicompostaje**. Este comportamiento coincide con lo reportado por Jiménez & García (1992) y Román (2013), quienes indican que un **pH** estable entre **6,5 y 7,5** refleja un proceso en equilibrio y con adecuada actividad microbiana.

En la fase final el pH mostró un aumento gradual, alcanzando valores de **7,5 a 7,8** en el compost y **7,0 a 7,3** en el vermicompost. Este incremento está relacionado con la liberación de **amoníaco (NH₃)** y la mineralización del nitrógeno orgánico, así como con la **degradación de los ácidos orgánicos** remanentes. Este comportamiento también fue descrito por Valverde et al. (2022), quienes observaron un ligero incremento del pH (de 8,67 a 8,81) en la pila de compostaje de San Andrés, asociándolo a la mineralización de la materia orgánica y a la liberación de compuestos alcalinos.

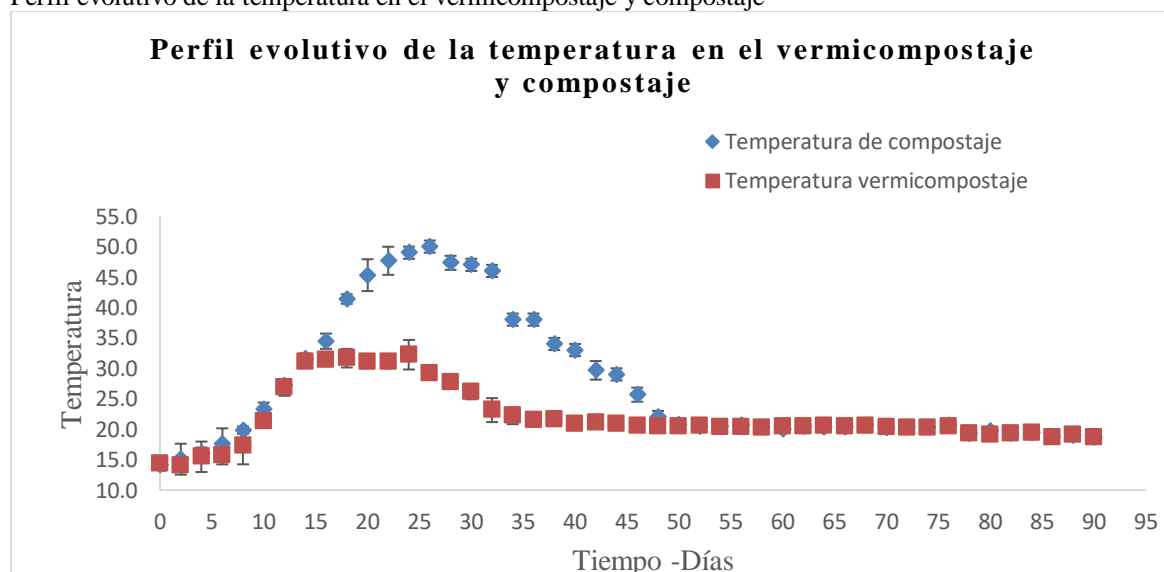
Por lo tanto, los resultados obtenidos confirman que, bajo las condiciones climáticas de Riobamba (12–15 °C y humedad variable), tanto el compostaje como el vermicompostaje logran mantener un pH dentro del rango óptimo (6–8), garantizando la viabilidad de ambos procesos para transformar residuos orgánicos locales en abono.

4.2.2. Temperatura

La evolución de la temperatura fue un parámetro clave para evaluar la dinámica del proceso de compostaje y vermicompostaje, ya que refleja la actividad microbiana y permite identificar las diferentes fases de descomposición de la materia orgánica. En la Figura 4 se presenta el perfil térmico de ambos tratamientos a lo largo del tiempo, lo que evidencia las variaciones de temperatura alcanzadas en cada caso.

Figura 5

Perfil evolutivo de la temperatura en el vermicompostaje y compostaje



En la Figura 4 se observa que la evolución de la temperatura difirió entre los dos tratamientos. En el compostaje tradicional, la temperatura **aumentó** de forma progresiva durante los **primeros 30 días**, alcanzando **un valor máximo de 55 °C**, correspondiente a la **fase termofílica** este incremento se debe a la actividad microbiana, que libera calor mediante reacciones exotérmicas de acuerdo con Bohórquez et al. (2015), durante esta etapa las temperaturas pueden llegar hasta los 70 °C, niveles adecuados para la eliminación de patógenos y la degradación de compuestos orgánicos más complejos, pero temperaturas superiores a 75 °C mantenidas por periodos prolongados pueden resultar perjudiciales, ya que afectan a los microorganismos benéficos y favorecen pérdidas de nitrógeno (Arias, 2022).

En el **vermicompostaje** la **temperatura permaneció dentro del rango mesófilo (18–25 °C)** durante todo el proceso, sin registrar picos elevados esta estabilidad térmica se puede relacionar con la acción de las lombrices californianas (*Eisenia foetida*), que mejoran la aireación, homogenizan el sustrato y regulan la actividad microbiana, evitando así acumulaciones excesivas de calor (Sanabria et al., 2008).

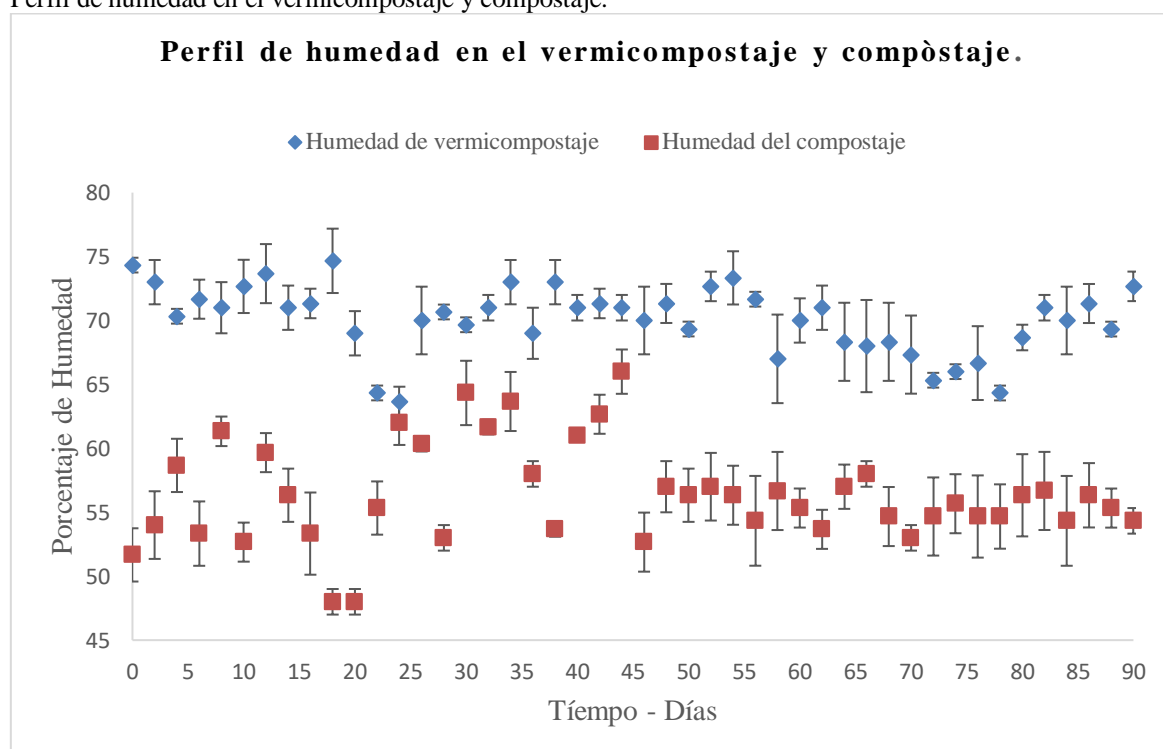
Es importante destacar que el compostaje y el vermicompostaje no solo se diferencian en sus procedimientos, sino también en la comunidad microbiana que interviene en cada uno. En el compostaje tradicional predominan bacterias termófilas, muchas de las cuales son difíciles de cultivar en laboratorio (Sanabria et al., 2008), además de microorganismos termófilos facultativos capaces de sobrevivir a las altas temperaturas mediante la formación de esporas, lo que les permite recolonizar el sustrato una vez que la temperatura desciende.

Por el contrario, el vermicompostaje mantiene una diversidad microbiana más amplia y estable a lo largo de todo el proceso, incluyendo bacterias, hongos saprófitos, protozoos, nematodos y microartrópodos, junto con la microflora propia del tracto digestivo de *Eisenia foetida*. Un aspecto relevante es que las heces de las lombrices están recubiertas por un moco intestinal que funciona como fuente de carbono, facilitando la atracción y proliferación de microorganismos beneficiosos del suelo (Domínguez & Pérez, 2018).

4.2.3. Humedad

El monitoreo de la humedad en las pilas resulta fundamental para garantizar la eficiencia del proceso de descomposición. Este parámetro incide directamente en la actividad microbiana y en el bienestar de las lombrices californianas, elementos clave en el compostaje y vermicompostaje respectivamente. Mantener un rango adecuado de humedad evita la compactación del material y la aparición de condiciones anaerobias, favoreciendo así la aireación y la transformación estable de los residuos orgánicos en abono. Por tal motivo, a continuación, se presentan los resultados del seguimiento realizado a la humedad de las pilas durante el proceso experimental.

Figura 6
Perfil de humedad en el vermicompostaje y compostaje.



En el tratamiento de vermicompostaje, la humedad se mantuvo dentro de un rango de 65 % a 70 %, considerado óptimo tanto para la actividad de las lombrices californianas (*Eisenia foetida*) como para el desarrollo de microorganismos benéficos. Diversos estudios señalan que una humedad adecuada facilita el desplazamiento y la alimentación de las lombrices, además de estimular la actividad microbiana necesaria para la descomposición del material orgánico (Monroy & Prada, 2019). Mantener valores superiores al 60 % también contribuye a evitar condiciones anaeróbicas, que pueden generar olores desagradables y compuestos tóxicos. De acuerdo con Maisarah et al. (2015) niveles óptimos de humedad no solo favorecen a las lombrices, sino que incrementan la diversidad microbiana, lo que se traduce en un producto final más rico en nutrientes y con mejores propiedades agronómicas.

Por otro lado, el compostaje convencional presentó valores más bajos y una mayor variabilidad, con rangos que fluctuaron entre el 45 % y el 65 %. En varias etapas del proceso, la humedad llegó a descender por debajo del 50 %, lo cual puede restringir la actividad microbiana y ralentizar la degradación de la materia orgánica, tal como indican Hargreaves & Warman (2008).

Aun así, es importante señalar que, aunque humedades inferiores al 50 % representan una limitación para la biodegradación, no se observó una interrupción completa del proceso. Según Villar et al. (2016), las pilas de compost pueden tolerar fluctuaciones temporales siempre que se realicen manejos correctivos como riegos para restituir los valores de referencia.

4.3. Análisis físicoquímico del compost y vermicompost

En la Tabla 9 y 10 se presentan los resultados de los análisis físicoquímicos del vermicompost y compost en donde se incluyen los principales nutrientes y parámetros de calidad evaluados (N, P, K, MO, conductividad eléctrica, Mg, Ca, pH y humedad), estos valores permiten caracterizar el producto final y compararlo.

Vermicompost

Tabla 9

Elementos y nutrientes en el vermicompost

Elementos y nutrientes presentes en el vermicompost resultante											
	N (%)	P (%)	K (%)	MO (%)	C.or g (%)	C/N	Ce(u s/cm)	Mg (%)	Ca (%)	pH	hum edad (%)
Pila 1	0,92	0,43	1,43	23,93	13,88	15,09	429	0,62	4,02	8	46,60
Pila 2	0,87	0,39	1,03	25,63	14,87	17,09	436	0,63	3,94	8,05	48,01
Pila 3	0,79	0,37	0,98	22,20	12,87	16,29	420	0,54	3,81	8,26	47,39
Prom	0,86	0,39	1,15	23,92	13,87	16,16	428	0,59	3,92	8,10	47,33
SD	0,06	0,03	0,24	1,71	1	1,01	8,02	0,05	0,11	0,13	0,71

Compost

Tabla 10

Elementos y nutrientes del compost.

Elementos y nutrientes presentes en el compost resultante											
	N (%)	P (%)	K (%)	MO (%)	C.or g (%)	C/N	Ce(u s/cm)	Mg (%)	Ca (%)	pH	hum edad (%)
Pila 1	0,59	0,35	0,84	18,74	10,87	18,42	174,4	0,56	3,12	8	41,43
Pila 2	0,65	0,37	0,87	16,98	9,85	15,15	171,5	0,54	3,04	7,71	35,89
Pila 3	0,73	0,41	0,82	19,89	11,54	15,82	250	0,61	2,94	7,54	39,30
Prom	0,65	0,37	0,84	18,54	10,75	16,46	198,6	0,57	3,03	7,75	38,87
SD	0,07	0,03	0,03	1,47	0,85	1,41	44,51	0,04	0,09	0,23	2,79

Nitrógeno (N)

La prueba de t de Student reveló diferencias estadísticamente significativas en el contenido de nitrógeno total entre los tratamientos ($p = 0,0216$), lo que sugiere que el tipo de compostaje influye directamente en la concentración de nitrógeno total en el producto final.

El tratamiento con vermicompost presentó una media de **0,86%** de nitrógeno, superando significativamente al compost tradicional, que mostró un contenido de **0,66%**. El mayor contenido de nitrógeno observado en el vermicompost puede explicarse por la actividad biológica de las lombrices, las cuales no solo fragmentan y transforman la materia

orgánica, sino que también contribuyen a la mineralización del nitrógeno durante su tránsito digestivo como señalan (Gonzales & Toro, 2024). Esto explica por qué este método suele ser más eficiente que el compostaje tradicional, donde la descomposición ocurre a un ritmo más lento y con menor control biológico.

Las pruebas de normalidad indicaron que ambos tratamientos presentan una distribución normal, mientras que la prueba F confirmó la homogeneidad de varianzas ($p = 0,9314$) estos resultados respaldan la validez del análisis estadístico utilizado en la comparación entre tratamientos.

Su mayor concentración de nitrógeno total en el vermicompost, puede atribuirse a la acción conjunta de las lombrices y los microorganismos asociados al vermicompostaje, ya que su actividad favorece una descomposición más eficiente de la materia orgánica y mejora la disponibilidad de nitrógeno en formas fácilmente asimilables por las plantas. (Domínguez & Pérez, 2018; Edwards & Arancon, 2022).

Fósforo (P)

El valor de $p = 0,468$ indica que **no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos** con respecto al contenido de fósforo. Por tanto, los tratamientos no influyen significativamente en los niveles de fósforo del compost.

La prueba de **normalidad de Shapiro-Wilk** aplicada a ambos tratamientos dio como resultado **un valor de $p = 0,6369$** , lo que confirma que los datos siguen una distribución normal estos resultados permitieron aplicar la prueba t de tipo paramétrico para comparar las medias entre ambos tratamientos. Las concentraciones promedio fueron de 0,3966 % en el vermicompost y 0,3766 % en el compost, el intervalo de confianza al 95 % se ubicó entre -0,0492 y 0,0892, rango que incluye el valor 0, lo que confirma que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos.

Según Bernal et al. (2009), señalan que el fósforo presente en los residuos orgánicos suele encontrarse mayoritariamente en formas orgánicas, las cuales requieren un proceso de mineralización gradual antes de transformarse en formas disponibles para las plantas. Esto explica por qué, aun con diferencias en las dinámicas de descomposición entre compostaje y vermicompostaje, las concentraciones finales de fósforo pueden mantenerse similares.

Potasio (K)

El análisis de t Student realizado sobre los datos del porcentaje de potasio en los diferentes tratamientos no mostró diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,1656$) entre tratamientos, lo que indica que, bajo las condiciones evaluadas, no hubo un efecto significativo del tipo de compostaje sobre la concentración de potasio. Aunque la prueba estadística no evidenció diferencias significativas, al revisar los valores promedio se observa que el vermicompost presentó una concentración de potasio ligeramente mayor (1,15 %) en comparación con el compost tradicional (0,84 %).

Estos resultados son coherentes con estudios previos que señalan que el vermicompost suele mostrar una mayor disponibilidad de nutrientes entre ellos el potasio debido a la intensa actividad microbiana y al efecto de fragmentación generado por las lombrices (*Eisenia foetida*), lo cual favorece procesos de mineralización y solubilización de nutrientes (Bernal et al., 2009; Hargreaves & Warman, 2008).

Según Bernal et al. (2009), el contenido de potasio en compost orgánico suele situarse entre 0,5 % y 1,8 %, por lo que los valores obtenidos para el vermicompost se encuentran dentro del rango superior, mientras que el compost tradicional se ubica en un intervalo medio. De forma similar Hargreaves & Warman (2008) reportan concentraciones de potasio entre 0,3 % y 2,5 % en compost derivados de residuos orgánicos, lo que confirma que los valores obtenidos se ubican dentro de rangos aceptables y corresponden a un producto de buena calidad.

Carbono Orgánico (C.org)

Los resultados obtenidos en esta investigación mostraron que el tratamiento con **vermicompost** tuvo un **contenido significativamente mayor** de **carbono orgánico** en comparación con el **compost tradicional**, el vermicompost alcanzó un promedio de **13,87%**, mientras que el compost presentó **10,75%** diferencia que fue confirmada estadísticamente mediante la **prueba t de Welch**, con un valor **p = 0,015**, lo cual indica que la diferencia entre ambos tratamientos es significativa.

Este comportamiento coincide con lo señalado por Gómez et al. (2008), quienes indican que la actividad de las lombrices durante el proceso favorece una humificación más eficiente de los residuos, lo que se traduce en una mayor retención de carbono orgánico estable..

Además, investigaciones de Lim et al. (2016) demuestran que el vermicompost tiene mayor contenido de carbono debido a una menor pérdida de CO₂ durante el proceso, lo que indica una mayor eficiencia en la conservación de materia orgánica útil para mejorar la estructura del suelo y su capacidad de retención de agua y nutrientes.

El contenido más bajo de carbono en el compost tradicional puede atribuirse a un proceso más agresivo de oxidación de la materia orgánica, donde la descomposición microbiana genera mayores emisiones de dióxido de carbono, como explican Bernal et al. (2009) estos resultados sugieren que el vermicompost no solo es más estable, sino que aporta una mayor fracción de carbono orgánico al suelo.

Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que existe una diferencia significativa en el contenido de calcio entre los tratamientos de vermicompost y compost.

la prueba t de Welch aplicada a los datos del calcio mostró diferencia significativa entre los tratamientos donde el vermicompost presentó un promedio más alto (3.92) en

comparación con el compost tradicional (3.03) esto indican que el vermicompostaje favorece una mayor disponibilidad de calcio en el producto final

los resultados obtenidos del magnesio, el vermicompost registró un promedio ligeramente superior (0.59 %) frente al compost tradicional (0.57 %), la prueba t de Welch no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p = 0.495$), lo que sugiere que no existe evidencia suficiente para afirmar que el vermicompost posee un contenido de magnesio considerablemente mayor que el compost.

El contenido de calcio y magnesio también tiende a ser mayor en el vermicompost ya que estos nutrientes son esenciales para el desarrollo de las plantas, ya que el calcio es fundamental para la formación de paredes celulares y el magnesio es un componente clave de la clorofila (Pottipati et al., 2022).

pH

Los análisis de normalidad realizados mediante la prueba de **Shapiro-Wilk** indicaron que los datos de ambos tratamientos presentan **una distribución normal (vermicompost: $p = 0.348$; compost: $p = 0.7145$)**, lo que valida el uso de pruebas paramétricas para la comparación de medias.

La comparación de las **medias de pH** mediante la **prueba t de Welch no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p = 0.1017$)** el intervalo de confianza del 95 % para la diferencia de medias incluyó el valor cero, lo que confirma la ausencia de una diferencia significativa entre los tratamientos.

La ligera alcalinidad observada en el vermicompost puede estar relacionada con la acción de las lombrices, que durante su actividad digestiva neutralizan los ácidos orgánicos presentes en el sustrato, ayudando a un equilibrio químico más estable en el producto vermicompost según Gómez et al. (2008), este fenómeno se debe a la degradación más eficiente de los compuestos orgánicos por parte de la microbiota asociada al tracto digestivo de las lombrices.

Los valores de **pH** observados en ambos tratamientos se encuentran dentro del rango óptimo para el uso agrícola (**6.5 a 8.5**), lo cual es importante para la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana en el suelo (Bernal et al., 2009).

Conductividad eléctrica (CE)

Los resultados del análisis estadístico evidenciaron diferencias significativas en la conductividad eléctrica (CE) entre los dos tratamientos .El vermicompost registró un valor promedio de 428.33 $\mu\text{S/cm}$, mientras que el compost tradicional alcanzó 198.63 $\mu\text{S/cm}$, lo que refleja una mayor concentración de sales solubles en el vermicompost de acuerdo con Domínguez & Pérez (2018), el vermicompostaje permite una mayor mineralización de la materia orgánica debido a la acción combinada de microorganismos y lombrices

especialmente *Eisenia foetida*, lo que favorece la liberación de nutrientes solubles y, en consecuencia, un incremento de la conductividad eléctrica.

Asimismo, Atiyeh et al. (2000) demostraron que los vermicompost presentan una mayor disponibilidad de nutrientes en comparación con compost convencionales, lo que también se traduce en valores más altos de conductividad eléctrica en su estudio, los vermicomposts elaborados a partir de residuos vegetales presentaron valores de CE superiores a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, resultados que son comparables a los obtenidos en la presente investigación.

Por otro lado, el compost tradicional presentó una **Ce significativamente menor (198.63 $\mu\text{S}/\text{cm}$)**, lo cual puede estar relacionado con una menor tasa de descomposición y mineralización durante el proceso, como señalan Bernal et al. (2009).

Comparación de las características agronómicas del compost y vermicompost con normas internacionales.

Varios parámetros se ubicaron próximos a los límites de referencia técnico-normativos. El pH del vermicompost se ubicó próximo al extremo superior del intervalo recomendado (6–7,5) y CE por debajo del valor ($\text{CE} < 5 \text{ dS}/\text{m}$) recomendado por el US Composting Council (2001). La relación C/N del compost y vermicompost se redujo a un valor final < 20 , lo que indicó que hubo un buen grado de madurez (Bernal et al., 2009). En contraste, la materia orgánica no se situó en el límite, sino por debajo de los valores de referencia USCC (Tabla 11)

Limitación del estudio

Los resultados obtenidos corresponden únicamente a la **caracterización físicoquímica** de los productos finales.

No se evaluaron parámetros microbiológicos ni la presencia de metales pesados, que son requeridos por la **UE 2019/1009** para una caracterización integral.

Por ello, los valores presentados deben interpretarse como una **evaluación parcial del comportamiento químico** de los abonos obtenidos.

Tabla 11

Comparación de parámetros físico-químicos entre compost tradicional y vermicompost con las directrices americanas y europeas.

Parámetro	Compost promedio	Vermicompost Promedio	US Composting Council (2001)	Reglamento (UE) 1009/2019
N (g/kg)	6,50	8,60	> 10	-
P (g/kg)	3,70	3,90	> 10	-
K (g/kg)	8,4 0	11,5	-	-
MO (%)	18,53	23,89	50-60	-
C.org (%)	10,75	13,87	-	> 7,5
C/N	16,46	16,16	-	-

Ce(ds/m)	0,19	0.43	< 5 ds/m	-
Mg (%)	0,57	0,59	-	-
Ca (%)	3,03	3,92	-	-
pH	7,75	8,10	6-7,5	-
humedad	38,87	47,33	-	-

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- En este estudio las pilas se formularon con una relación **C/N de 26,95** lo cual representó una proporción adecuada de materia orgánica para el proceso de compostaje, al mantener un equilibrio entre materiales ricos en carbono y nitrógeno lo que favoreció la actividad microbiana responsable de la descomposición ya que durante el proceso, esta relación C/N disminuyó hasta alcanzar valores finales de **16,16** en el vermicompost y **16,46** en el compost tradicional, lo que evidencia una degradación eficiente de la materia orgánica esta reducción indica la mineralización del carbono y la estabilización del nitrógeno, procesos clave que conducen a la obtención de un compost maduro y químicamente estable.
- El monitoreo de los parámetros de temperatura, humedad y pH evidenció comportamientos diferentes según su tratamiento, en el compostaje, la temperatura alcanzó valores cercanos a los **55 °C**, correspondientes a la fase termofílica, mientras que en el vermicompostaje se mantuvo próxima a la temperatura ambiente, condición necesaria para la actividad de *Eisenia foetida*, la humedad se estabilizó entre **65 % y 75 % en el vermicompostaje y entre 50 % y 60 % en el compostaje**, rangos que coinciden con los valores considerados óptimos en la literatura para favorecer la actividad microbiana y la descomposición y por cuanto **al pH ambos tratamientos se mantuvieron dentro del intervalo de 6 a 8**, lo que indica condiciones adecuadas para la estabilización de la materia orgánica y el desarrollo de microorganismos beneficiosos durante el proceso.
- Los análisis fisicoquímicos realizados sobre el compost y vermicompost evidenciaron diferencias entre tratamientos, el vermicompost presentó concentraciones superiores de nitrógeno de **0.86%** frente al **0.66%** registrado en el compost tradicional, así como mayores niveles de calcio (**3.92%** en vermicompost versus **3.03%** en compost) y carbono orgánico (**13.87%** y **10.75%**, respectivamente) bajo las condiciones propuestas de este experimento indicando que la incorporación de lombrices californianas da un perfil composicional más significativo frente al compost tradicional y al comparar los resultados con los rangos técnico-normativos establecidos por el Council of the European Union (Regulation EU No. 2019/1009), y la US Composting Council (USCC), se observó que varios parámetros se ubicaron próximos a los límites mínimos de referencia.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se debe mantener una relación carbono-nitrógeno entre 25 y 30 para optimizar la actividad microbiana y acelerar la descomposición de los residuos orgánicos. Utilizar materiales ricos en carbono como restos de cosecha de maíz y materiales ricos en nitrógeno como leguminosas o estiércol de vaca.
- Realizar un análisis elemental de los residuos orgánicos que se deseen evaluar su biodegradabilidad.

- Realizar un monitoreo constante de temperatura, humedad y pH durante el proceso. La humedad debe ser del 60-80%, y el pH debe estar entre 6-8 para asegurar un ambiente favorable para la actividad biológica.

BIBLIOGRAFÍA

- Alarcon, J., Gordillo, Y., & Rivera, G. (2019). Optimización del proceso de compostaje mediante la introducción de un abono microbial que contiene *Streptomyces* sp, *Aspergillus niger* y *Lactobacillus* sp. In *Colegio mayor de cundinamarca*. <https://repositorio.unicolmayor.edu.co/handle/unicolmayor/280>
- Arenas, C. (2017). *Implementación de un sistema integral de compostaje para el tratamiento de los residuos orgánicos en el Centro Educativo Rural Josefa Romero, Municipio de Dabeiba*. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/3303>
- Arias, M. (2022). *Evaluación química y fitotóxica de varios tratamientos de vermicompost obtenidos de restos vegetales más biochar*.
- Arízaga, R., Fernández, J., & Vasconez, S. (2023). Sistema de compostaje automatizado para desechos sólidos orgánicos generados en un mercado. *Polo Del Conocimiento*, 8(8), 226–244. <https://doi.org/10.23857/pc.v8i8>
- Arrigoni, J. P. (2016). *Optimización del proceso de compostaje de pequeña escala*. [https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/4634/Arrigoni%2C J.P. Optimización del proceso de compostaje de pequeña escala.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttp://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2337163%0Ahttps://rdu.unc.edu.ar/handle/110](https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/4634/Arrigoni%2C%20J.P.%20Optimizaci%C3%B3n%20del%20proceso%20de%20compostaje%20de%20peque%C3%B1a%20escala.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttp://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2337163%0Ahttps://rdu.unc.edu.ar/handle/110)
- Atiyeh, R. M., Domínguez, J., Subler, S., & Edwards, C. A. (2000). Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei*, Bouche) and the effects on seedling growth. *Pedobiologia*, 44(6), 709–724. [https://doi.org/10.1078/S0031-4056\(04\)70084-0](https://doi.org/10.1078/S0031-4056(04)70084-0)
- Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
- Bohórquez, A., Puentes, Y., & Menjivar, J. C. (2015). Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 15(1), 73–81. https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num1_art:398
- Bustanza, R., & Gomero, L. (2023). Optimization of the composting process with coffee pulp in the annex Unión Pucusani (Chanchamayo-Junín). *Idesia*, 41(1), 85–95. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292023000100085>
- Camacho, F., Uribe, L., Newcomer, Q., Masters, K., & Kinyua, M. (2018). Bio-optimización del compost con cultivos de microorganismos de montaña (MM) y lodos digeridos de biodigestor (LDBIO). *UNED Research Journal*, 10(2), 330–341. <https://doi.org/10.22458/urj.v10i2.2163>
- Canchan, K., Cordova, J., & Rojas, E. (2023). *El vermicompost, una alternativa en la recuperación de suelos contaminados con metales pesados en la Mina Yauricocha 2023*.
- Carr, R. (2019). *Conceptos básicos sobre el compostaje en el patio trasero: una hoja de trucos* - Rodale Institute. <https://rodaleinstitute.org/es/blog/conceptos-básicos-del-compostaje-en-el-patio-trasero-una-hoja-de-trucos/>

- Castillo, L. C. (2020). Evaluación de la calidad del compost obtenido a partir de residuos orgánicos y microorganismos eficaces (EM) en el distrito de Huayucachi, Huancayo, 2019 [Universidad Continental]. In *Universidad Continental*. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8245>
- Docampo, R. (2013). Compostaje y compost. *Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria INIA*, 63–67. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/1839/1/128221231213112259.pdf>
- Dominguez, J., & Edwards, C. A. (2010). Biology and ecology of earthworm species used for vermicomposting. *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management*, 27–40. <https://doi.org/10.1201/b10453>
- Domínguez, J., & Pérez, D. (2018). Desarrollo y nuevas perspectivas del vermicompostaje. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*, 227. <https://jdguez.webs.uvigo.es/wp-content/uploads/2011/12/Desarrollo-y-nuevas-perspectivas-del-Vermicompostaje.pdf>
- Ecuadorescucha. (2024). *Usuarios de los Mercados San Alfonso y La Condamine fueron Capacitados en el Marco del Proyecto “SERO” – ECUADORESCUCHA*. https://www.ecuadorescucha.com/archivos/4358?utm_source=chatgpt.com
- Edwards, C. A., & Arancon, N. Q. (2022). Biology and Ecology of Earthworms: Fourth Edition. In *Biology and Ecology of Earthworms: Fourth Edition*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74943-3>
- FAO. (2014). Residuos agrícolas y Ganaderos. In *Bioenergía y Seguridad Alimentaria Evaluación Rápida (BEFS)*. <http://www.fao.org/3/a-bp865s.pdf>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba. (2025). *Reforzamiento de la Separación de Residuos Sólidos en Mercados - Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba*. <https://www.gadmriobamba.gob.ec/index.php/noticiasgadmriobamba/242-reforzamiento-de-la-separacion-de-residuos-solidos-en-mercados>
- Gómez, M., Lazcano, C., & Domínguez, J. (2008). The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure. *Chemosphere*, 70(3), 436–444. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.06.065>
- Gonzales, J., & Toro, J. (2024). *Elaboración de un abono orgánico a partir de residuos agropecuarios de la zona de Nabón*.
- Hargreaves, J., & Warman, P. (2008). A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123(1–3), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.07.004>
- Haug, R. T. (2018a). The Practical Handbook of Compost Engineering. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. <https://doi.org/10.1201/9780203736234/PRACTICAL-HANDBOOK-COMPOST-ENGINEERING-ROGERTIM-HAUG/ACCESSIBILITY-INFORMATION>
- Haug, R. T. (2018b). The Practical Handbook of Compost Engineering. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. <https://doi.org/10.1201/9780203736234/PRACTICAL-HANDBOOK-COMPOST-ENGINEERING-ROGERTIM-HAUG>
- Haug, R. T. (2018c). Process Dynamics III — Building the Complete System. *The Practical*

- Handbook of Compost Engineering*, 469–492.
<https://doi.org/10.1201/9780203736234-13/PROCESS-DYNAMICS-III-BUILDING-COMplete-SYSTEM-ROGER-HAUG>
- Iannotti, D. A., Pang, T., Toth, B. L., Elwell, D. L., & Keener, H. M. (1993). A quantitative respirometric method for monitoring compost stability. *Compost Science and Utilization*, 1(3), 52–65. <https://doi.org/10.1080/1065657X.1993.10757890>
- INEC. (2024). Gestión de residuos sólidos 2023: Boletín técnico. In *Instituto Nacional de Estadística y Censos*.
- Jiménez, E., & García, V. (1992). Determination of maturity indices for city refuse composts. *Agriculture, Ecosystems and 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)
- Li, J.-J., Zhou, B., Zhang, C., Zhang, J., Xu, H., Yang, X.-X., Chen, X.-F., & Dai, J. (2013). [Effects of herb residue vermicompost on maize growth and soil fertility]. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao = The Journal of Applied Ecology*, 24(9), 2651–2657. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24417126>
- Lim, S. L., Lee, L. H., & Wu, T. Y. (2016). Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: Recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 111, 262–278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.083>
- MAATE-Proyecto GRECI. (2022). Diagnóstico Sectorial De La Gestión Integral De Residuos Y Desechos Sólidos No Peligrosos En Municipios Del Ecuador. In *Ministerio Del Ambiente, Agua Y Transición Ecológica*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/07/1.pdf>
- Maisarah, A., Kamar, Z., & Syafawati, J. (2015). *El uso de vermicompost en la agricultura orgánica: descripción general, efectos en el suelo y economía*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25130895/>
- Martínez, L., & Martínez, E. (2023). *Elaboración de compost a partir de residuos sólidos orgánicos de cultivos generados en diferentes municipios del departamento de Córdoba (Puerto Escondido, Chinú, Cereté y Montería)* [Universidad de Córdoba]. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/6974>
- Meena, A., Karwal, M., & Dutta, D. (2021). *Compostaje: Fases y factores responsables de un compostaje eficiente y mejorado*. https://www.researchgate.net/publication/348098151_Composting_Phases_and_Factors_Responsable_for_Efficient_and_Improved_Composting
- Meher, B. K., Das, L., & Mohanty, A. K. (2014). Metabolic Stroke in Biotinidase Deficiency: A Case Report. *Asian Journal of Clinical Pediatrics and Neonatology*, 2(3), 1–2. <https://aijournals.com/index.php/ajcpn/article/view/184>
- Ministerio del ambiente Agua y Transición Ecológica. (2017). Gestión de residuos sólidos y economía circular inclusiva. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 3, 2231–2307. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYW50MzktZTEzZi00Y2NhLTljNmQtMDM2MWYyN2E5YmVklwiidCI6ImI5MmFkMDkzLTRhODYtNGZiNS1hY2VhLWNIMWU1ZmJiYWVxMyJ9>
- Monroy, A., & Prada, L. (2019). *Optimización del proceso de compostaje para el*

- aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en el parque Jaime Duque ubicado en el municipio de Tocancipá, Cundinamarca.*
https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2148&context=ing_ambient_al_sanitaria
- Moral, R., Paredes, C., Bustamante, M. A., Marhuenda-Egea, F., & Bernal, M. P. (2009). Utilisation of manure composts by high-value crops: Safety and environmental challenges. *Bioresource Technology*, 100(22), 5454–5460. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.007>
- Moubareck, C. A., Alawlaqi, B., & Alhajeri, S. (2023). Characterization of physicochemical parameters and bacterial diversity of composted organic food wastes in Dubai. *Heliyon*, 9(6), e16426. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16426>
- Oñate, P. (2023). *Tratamiento mediante vermicompostaje de residuos orgánicos generados en el mercado huagra corral en la parroquia izamba, cantón Ambato* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21314>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). Food loss and food waste: Causes and solutions. In *Food Loss and Food Waste: Causes and Solutions*. <https://doi.org/10.4337/9781788975391>
- Oteng, M., Annepu, R., ‘Thanos’ Bourtsalas, A. C., Intharathirat, R., Charoenkit, S., & Kennard, N. (2018). Urban Solid Waste Management. *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*, 553–582. <https://doi.org/10.1017/9781316563878.022>
- Pan, C., Yang, H., Gao, W., Wei, Z., Song, C., & Mi, J. (2024). Optimization of organic solid waste composting process through iron-related additives: A systematic review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 351, p. 119952). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119952>
- Pottipati, S., Chakma, R., Haq, I., & Kalamdhad, A. S. (2022). Composting and vermicomposting: Process optimization for the management of organic waste. In *Advanced Organic Waste Management: Sustainable Practices and Approaches* (pp. 33–43). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85792-5.00015-0>
- Pradas, A. (2020). *Tratamiento de residuos orgánicos mediante vermicompostaje: Interacciones lombriz-microorganismo y aplicaciones biotecnológicas del vermicompost* Trabajo de Fin de Grado. [https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/21696/Tratamiento de residuos organicos mediante vermicompostaje Interacciones lombriz-microorganismos y aplicaciones biotecnologicas del vermicompost.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/21696/Tratamiento%20de%20residuos%20organicos%20mediante%20vermicompostaje%20Interacciones%20lombriz-microorganismos%20y%20aplicaciones%20biotecnologicas%20del%20vermicompost.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Rodriguez, A., & Baca, K. (2022). Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU): análisis de una década de gestión en países de Europa y América. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*, 43(1), 49–61. <https://doi.org/10.26807/remcb.v43i1.919>
- Román, P. (2013). Manual de compostaje del agricultor. *Oficina Regional de La FAO Para América Latina y El Caribe*, 112. <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- SAGARPA. (2015). Plan de manejo de residuos generados en actividades agrícolas primera etapa: Diagnóstico Nacional. In *Universidad Autónoma De Zacatecas “Francisco Salinas.”*

- https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346978/Manejo_de_residuos_Detallado.pdf
- Sanabria, N., Rusinque, M., & Villarreal, A. (2008). *Compostaje y lombricompostaje*.
- Silpa, K., Van, F., Yao, L. C., & Bhada-Tata, P. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 (Capítulo 2). In *The World Bank Group (Urban Development Series)*. 10.1596/978-1-4648-1329-0
- Su, L., Wu, T. Y., Lim, P. N., & Shak, K. P. Y. (2015). The use of vermicompost in organic farming: overview, effects on soil and economics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(6), 1143–1156. <https://doi.org/10.1002/JSFA.6849>
- Tiquia, S. M., & Tam, N. F. Y. (2002). Characterization and composting of poultry litter in forced-aeration piles. *Process Biochemistry*, 37(8), 869–880. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(01\)00274-6](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(01)00274-6)
- Tortosa, G. (2018a). *La humedad influye más en la actividad microbiana del compost que su temperatura – Compostando Ciencia*. COMPOSTANDO CIENCIAS. <https://www.compostandociencia.com/2018/02/la-humedad-influye-mas-en-la-actividad-microbiana-del-compost-que-su-temperatura/>
- Tortosa, G. (2018b). *La importancia de la relación carbono-nitrógeno en un compost*. Compostando Ciencia Lab. <https://www.compostandociencia.com/2018/04/la-importancia-de-la-relacion-carbono-nitrogeno-en-un-compost/>
- Valverde, V., Gavilanes, I., Idrovo, J., Carrera, L., Villagrán, R., Naranjo, N., & Paredes, N. (2022). *Evolución del proceso y recuperación calórica en el compostaje de residuos orgánicos agropecuarios de la parroquia de San Andrés, Chimborazo (Ecuador)*. <https://books.google.com.ec/books?id=gGWgEAAAQBAJ>
- Vargas, G., Alexander, O., Suasnabar, A., & Horacio, E. (2019). Sistematización en la producción de abono orgánico de residuos de frutas y verduras en la planta de compostaje de un gobierno municipal, Comas, 2018. *Revista ECIPeru*, 30–45. <https://doi.org/10.33017/reveciperu2019.0006/>
- Villar, I., Alves, D., Pérez-Díaz, D., & Mato, S. (2016). Changes in microbial dynamics during vermicomposting of fresh and composted sewage sludge. *Waste Management*, 48, 409–417. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.011>
- Villegas, V., & Laines, J. (2017). Vermicompostaje: I avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(2), 393–406. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i2.59>
- Villegas, Vi., & Laines, J. (2017). Vermicompostaje: II avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(2), 407–421. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V8I2.60>
- Zhang, T., Li, H., Yan, T., Shaheen, S. M., Niu, Y., Xie, S., Zhang, Y., Abdelrahman, H., Ali, E. F., Bolan, N. S., & Rinklebe, J. (2023). Organic matter stabilization and phosphorus activation during vegetable waste composting: Multivariate and multiscale investigation. *Science of the Total Environment*, 891, 164608. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164608>

ANEXOS

Anexo 1 Calculo del Carbono y Nitrógeno de cada residuo utilizado para el compostaje

Estiércol de bobino.

$$\begin{aligned} \text{Agua} &= 1\text{kg} * (0,45) = 0,45\text{kg} \\ \text{materia seca} &= 1\text{kg} - 0,45\text{kg} = 0,55\text{kg} \\ N &= 0,55\text{kg} * (0,023) = 0,01265\text{kg} \\ C &= 0,55\text{kg} * (0,226) = 0,1243\text{kg} \end{aligned}$$

Restos de cosecha de maíz

$$\begin{aligned} \text{Agua} &= 1\text{kg} * (0,75) = 0,75\text{kg} \\ \text{materia seca} &= 1\text{kg} - 0,75\text{kg} = 0,25\text{kg} \\ N &= 0,25\text{kg} * (0,009) = 0,00225\text{kg} \\ C &= 0,25\text{kg} * (0,572) = 0,143\text{kg} \end{aligned}$$

Restos de frutas

$$\begin{aligned} \text{Agua} &= 1\text{kg} * (0,80) = 0,80\text{kg} \\ \text{materia seca} &= 1\text{kg} - 0,80\text{kg} = 0,20\text{kg} \\ N &= 0,2\text{kg} * 0,014 = 0,0028\text{kg} \\ C &= 0,2\text{kg} * 0,56 = 0,11\text{kg} \end{aligned}$$

Restos de leguminosas

$$\begin{aligned} \text{Agua} &= 1\text{kg} * (0,85) = 0,85\text{kg} \\ \text{materia seca} &= 1\text{kg} - 0,85\text{kg} = 0,15\text{kg} \\ N &= 0,15\text{kg} * 0,077 = 0,011\text{kg} \\ C &= 0,15\text{kg} * 0,0035 = 0,0005\text{kg} \end{aligned}$$

Con estos resultados se procedió a calcular la relación C/N de acuerdo a la ecuación establecida por Tchobanoglus:

$$\frac{C}{N} = \frac{x(C \text{ en } 1\text{kg de Estiercol}) + y(C \text{ en } 1\text{kg cosecha}) + z(C \text{ en } 1\text{kg de residuo de fruta}) + w(C \text{ en } 1\text{kg de leguminosas})}{x(N \text{ en } 1\text{kg de Estiercol}) + y(N \text{ en } 1\text{kg cosecha}) + z(N \text{ en } 1\text{kg de residuos de fruta}) + w(N \text{ en } 1\text{kg de leguminosas})} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\frac{C}{N} = \frac{10,5\text{kg}(0,1243) + 42\text{kg}(0,143) + 30\text{kg}(0,11) + 7,5\text{kg}(0,000539)}{10,5\text{kg}(0,01265) + 42\text{kg}(0,00225) + 30\text{kg}(0,0028) + 7,5\text{kg}(0,011)}$$

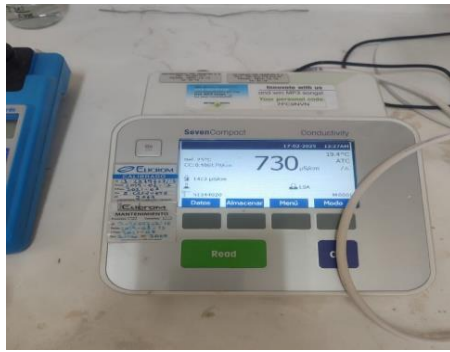
$$\frac{C}{N} = \frac{1,3051 + 6,006 + 3,3 + 0,00404}{0,13282 + 0,0945 + 0,084 + 0,0825}$$

$$\frac{C}{N} = \frac{10,615}{0,3938}$$

$$\frac{C}{N} = 26,95$$

Porcentaje de los residuos orgánicos

Residuos orgánicos	Kg	%
Estiércol bobino	10,5	11,67
Residuos de cosecha de maíz	42	46,67
Residuos de frutas	30	33,33
Residuos de leguminosas	7,5	8,33
Total	90	100



SETLAB

SERVICIOS DE TRANSFERENCIA Y LABORATORIOS AGROPECUARIOS
Dirección: Galo Plaza 28-55 y Jaime Roldós Teléfono 0998407494 Email: luciasilvax@yahoo.com
"Eficiencia, confianza y seguridad, en sinergia con su empresa"

REPORTE DE RESULTADOS

Nombre del Solicitante / Name of the Applicant

Srta. Mishell Alexandra Velarde Pintag

Domicilio / Address

Barrio el Pedregal

Teléfonos / Telephones

Producto para el que se solicita el Análisis / Product for which the Certification is requested

Abono Orgánico

Marca comercial / Trade Mark

No tiene

Características del producto / Ratings of the product

Color, Olor y sabor característico

Fecha de llegada de la muestra / Date of arrival of the sample

12-02-2025

Resultados de Minerales

Parámetro	Rmin 10949 M1	Rmin 10950 M2	Rmin 10951 M3	Rmin 10952 M4	Rmin 10953 M5	Rmin 10954 M6	Método / Norma
Nitrógeno, (%)	0,92	0,87	0,79	0,59	0,65	0,73	Método Oficial AOAC 2001.11
Fósforo, (%)	0,43	0,39	0,37	0,35	0,37	0,41	Método Oficial AOAC 925.10.2005
Potasio, (%)	1,43	1,03	0,98	0,84	0,87	0,82	Método Oficial AOAC 925.10.2005
Calcio, (%)	4,02	3,94	3,81	3,12	3,04	2,94	Método Oficial AOAC 985.35
Magnesio, (%)	0,62	0,63	0,54	0,56	0,54	0,61	Método Oficial AOAC 2015.06

Emitido en: Riobamba, el 3 de marzo de 2025

LUCIA
MONSERRA
TH SILVA
DELEY

Firmado
digitalmente por
LUCIA MONSERRATH
SILVA DELEY
Fecha: 2025.03.05
07:13:00 -05'00'

Ing. Lucía Silva Déley
RESPONSABLE TÉCNICO



Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.
Los resultados arriba indicados solo están relacionados con el producto analizado.

ANEXOS 2 DATOS ESTADISTICOS PROGRAMA R

Nitrógeno

```
> vermicompost <- c(0.92,0.87,0.79)
> compost <- c(0.59,0.65,0.73)
> shapiro.test(vermicompost)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: vermicompost
W = 0.98256, p-value = 0.747
```

```
> shapiro.test(compost)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: compost
W = 0.99324, p-value = 0.8428
```

```
> t.test(vermicompost,compost, var.equal= FALSE)
```

Welch Two Sample t-test

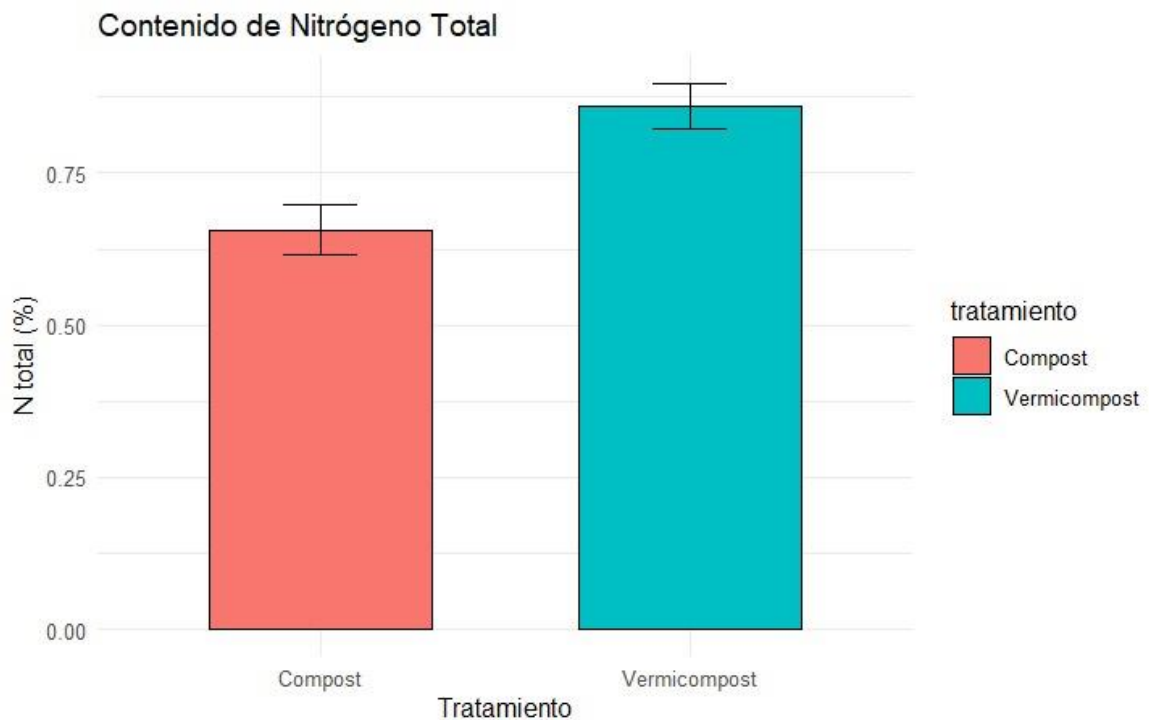
```
data: vermicompost and compost
t = 3.6651, df = 3.9813, p-value = 0.02166
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.04901625 0.35765041
sample estimates:
mean of x mean of y
0.8600000 0.6566667
```

```
> var.test(vermicompost,compost)
```

F test to compare two variances

```
data: vermicompost and compost
F = 0.87162, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.9314
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.02234927 33.99324324
sample estimates:
ratio of variances
 0.8716216
```

```
> # Librerías necesarias
> library(ggplot2)
> # Datos
> tratamiento <- c("Vermicompost", "Vermicompost", "Vermicompost",
+                 "Compost", "Compost", "Compost")
> n_total <- c(0.92, 0.87, 0.79, 0.59, 0.65, 0.73)
> datos <- data.frame(tratamiento, n_total)
> # Crear gráfico de barras con error
> ggplot(datos, aes(x = tratamiento, y = n_total, fill = tratamiento)) +
+   stat_summary(fun = mean, geom = "bar", color = "black", width = 0.6) +
+   stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.2) +
+   labs(title = "Contenido de Nitrógeno Total",
+        y = "N total (%)", x = "Tratamiento") +
+   theme_minimal()
> |
```

Fósforo

Shapiro-wilk normality test

```
data: vermicompost
W = 0.96429, p-value = 0.6369
```

```
> shapiro.test(compost)
```

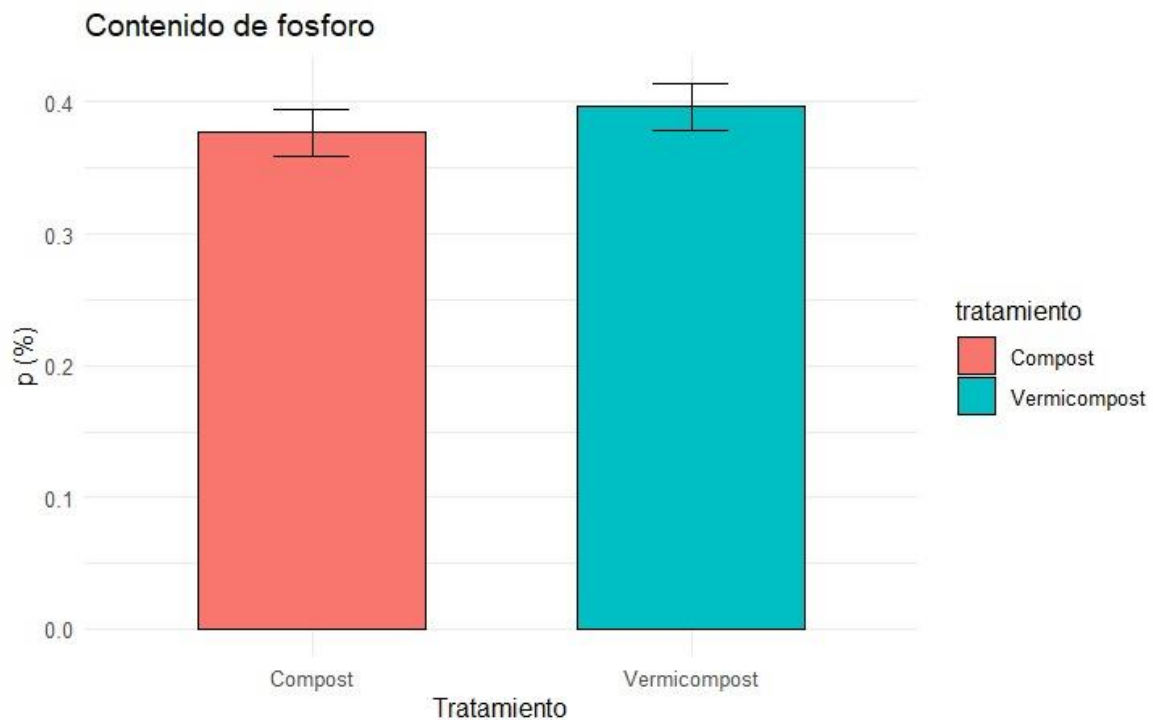
Shapiro-wilk normality test

```
data: compost
W = 0.96429, p-value = 0.6369
```

```
> t.test(vermicompost,compost, var.equal= FALSE)
```

Welch Two Sample t-test

```
data: vermicompost and compost
t = 0.80178, df = 4, p-value = 0.4676
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.04925671 0.08925671
sample estimates:
mean of x mean of y
0.3966667 0.3766667
```



Potasio

```
> vermicompost <- c(1.43,1.03,0.98)
> compost <- c(0.84,0.87,0.82)
> shapiro.test(vermicompost)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: vermicompost
W = 0.83219, p-value = 0.1939
```

```
> shapiro.test(compost)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: compost
W = 0.98684, p-value = 0.7804
```

```
> t.test(vermicompost,compost, var.equal= FALSE)
```

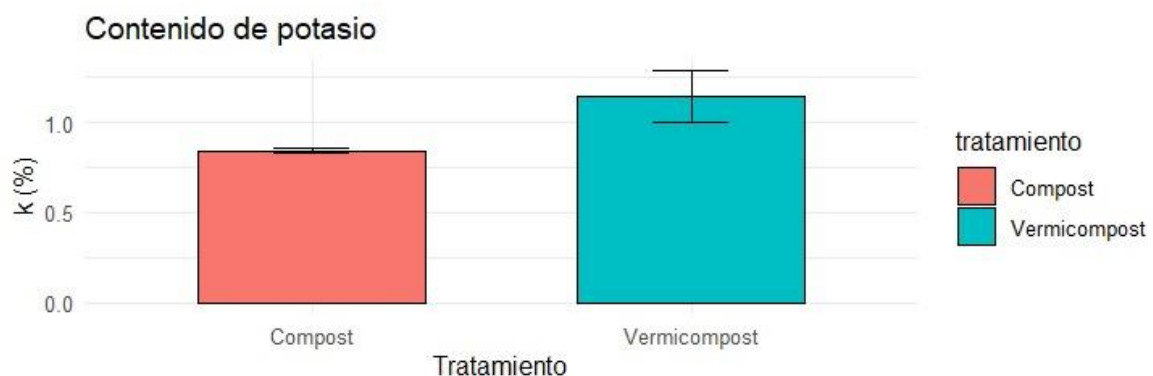
Welch Two Sample t-test

```
data: vermicompost and compost
t = 2.1191, df = 2.0416, p-value = 0.1656
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.3006640  0.9073307
sample estimates:
mean of x mean of y
1.1466667 0.8433333
```

```

> # Librerías necesarias
> library(ggplot2)
> # Datos
> tratamiento <- c("Vermicompost", "Vermicompost", "Vermicompost",
+                 "Compost", "Compost", "Compost")
> p <- c(0.43,0.39,0.37,0.35,0.37,0.41)
> # Librerías necesarias
> library(ggplot2)
> # Datos
> tratamiento <- c("Vermicompost", "Vermicompost", "Vermicompost",
+                 "Compost", "Compost", "Compost")
> k <- c(1.43,1.03,0.98,0.84,0.87,0.82)
> datos <- data.frame(tratamiento, k)
> # Crear gráfico de barras con error
> ggplot(datos, aes(x = tratamiento, y = k, fill = tratamiento)) +
+   stat_summary(fun = mean, geom = "bar", color = "black", width = 0.6) +
+   stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.2) +
+   labs(title = "Contenido de potasio",
+        y = "k (%)", x = "Tratamiento") +
+   theme_minimal()
> |

```



Carbono orgánico.

Shapiro-wilk normality test

```

data: vermicompost
W = 0.99997, p-value = 0.989

```

```
> shapiro.test(compost)
```

Shapiro-wilk normality test

```

data: compost
W = 0.9859, p-value = 0.7727

```

```
> t.test(vermicompost,compost, var.equal= FALSE)
```

welch Two Sample t-test

```

data: vermicompost and compost
t = 4.1154, df = 3.9002, p-value = 0.01544
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.9936942 5.2463058
sample estimates:
mean of x mean of y
 13.87333 10.75333

```

F test to compare two variances

```
data: vermicompost and compost
F = 1.3808, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.84
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.03540555 53.85184333
sample estimates:
ratio of variances
 1.380816
```

```
> # Librerías necesarias
> library(ggplot2)
> # Datos
> tratamiento <- c("Vermicompost", "Vermicompost", "Vermicompost",
+                 "Compost", "Compost", "Compost")
> carbono <- c(13.88,14.87,12.87,10.87,9.85,11.54)
> datos <- data.frame(tratamiento, carbono)
> # Crear gráfico de barras con error
> ggplot(datos, aes(x = tratamiento, y = carbono, fill = tratamiento)) +
+   stat_summary(fun = mean, geom = "bar", color = "black", width = 0.6) +
+   stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.2) +
+   labs(title = "Contenido de carbono orgánico",
+        y = "carbono (%)", x = "Tratamiento") +
+   theme_minimal()
```



Conductividad eléctrica

```
> vermicompost <- c(429,436,420)
> compost <- c(174.4,171.5,250)
> shapiro.test(vermicompost)

Shapiro-wilk normality test

data: vermicompost
W = 0.99482, p-value = 0.8624
> shapiro.test(compost)

Shapiro-wilk normality test

data: compost
W = 0.77767, p-value = 0.06223
> t.test(vermicompost,compost, var.equal= FALSE)

Welch Two Sample t-test

data: vermicompost and compost
t = 8.7971, df = 2.1298, p-value = 0.0104
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 123.6651 335.7349
sample estimates:
mean of x mean of y
 428.3333 198.6333
```



```
> var.test(vermicompost,compost)
```

F test to compare two variances

data: vermicompost and compost

F = 0.032475, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.06291

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

0.0008326955 1.2665299234

sample estimates:

ratio of variances

0.03247513

```
> # Librerías necesarias
```

```
> library(ggplot2)
```

```
> # Datos
```

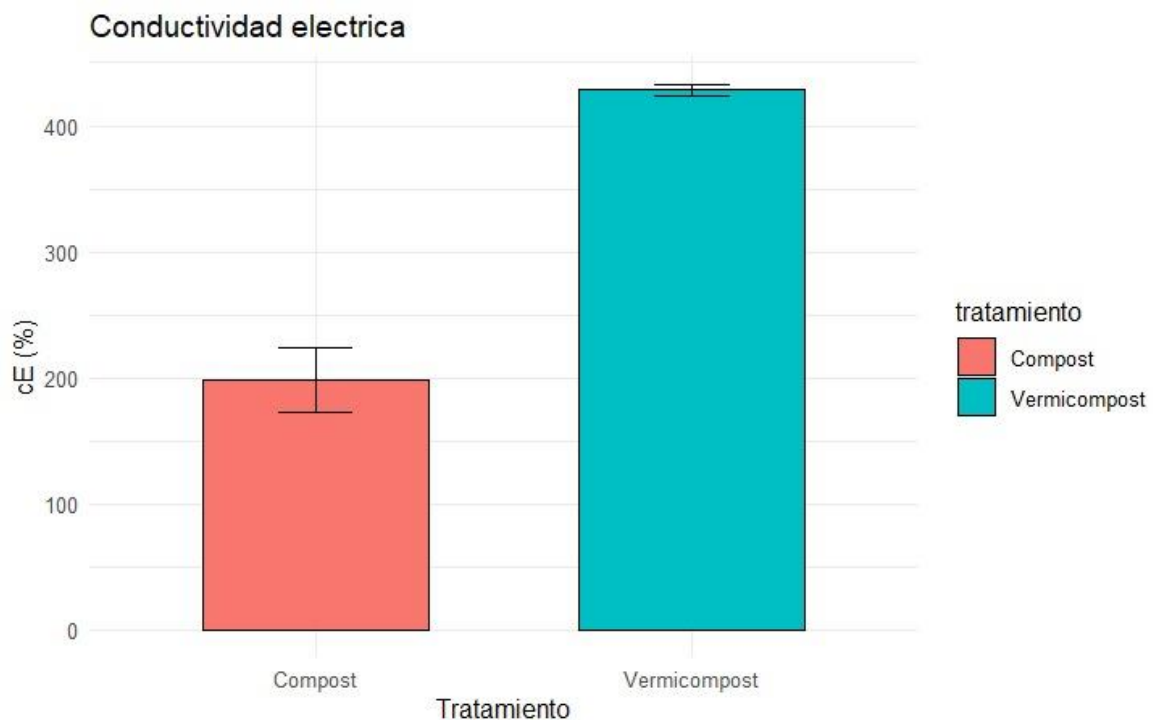
```
> tratamiento <- c("Vermicompost", "Vermicompost", "Vermicompost",  
+                  "Compost", "Compost", "Compost")
```

```
> ce <- c(429,436,420,174.4,171.5,250)
```

```
> datos <- data.frame(tratamiento, ce)
```

```
> # Crear gráfico de barras con error
```

```
> ggplot(datos, aes(x = tratamiento, y = ce, fill = tratamiento)) +  
+   stat_summary(fun = mean, geom = "bar", color = "black", width = 0.6) +  
+   stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.2) +  
+   labs(title = "Conductividad electrica",  
+        y = "cE (%)", x = "Tratamiento") +  
+   theme_minimal()
```



Magnesio

```
> vermicompost <- c(0.62,0.63,0.54)
> compost <- c(0.56,0.54,0.61)
> shapiro.test(vermicompost)
```

Shapiro-wilk normality test

```
data: vermicompost
W = 0.83219, p-value = 0.1939
```

```
> shapiro.test(compost)
```

Shapiro-wilk normality test

```
data: compost
W = 0.94231, p-value = 0.5367
```

```
> t.test(vermicompost,compost, var.equal= FALSE)
```

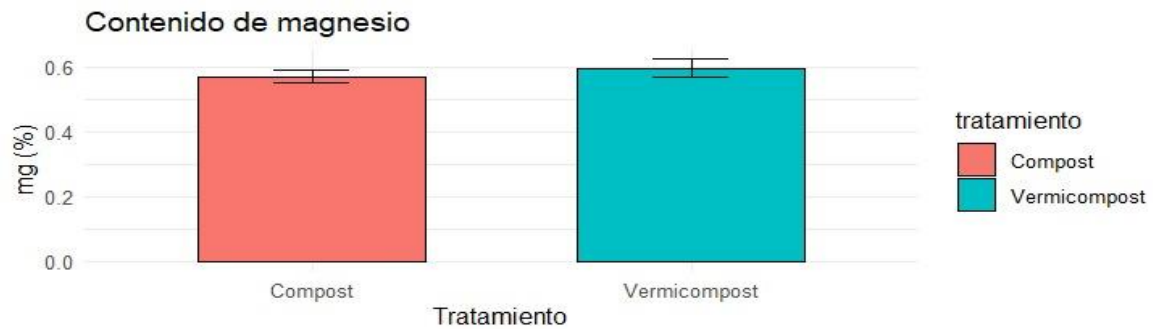
Welch Two Sample t-test

```
data: vermicompost and compost
t = 0.75593, df = 3.6625, p-value = 0.4954
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.0749416  0.1282749
sample estimates:
mean of x mean of y
0.5966667 0.5700000
> var.test(vermicompost,compost)
```

F test to compare two variances

```
data: vermicompost and compost
F = 1.8718, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.6964
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.04799474 73.00000000
sample estimates:
ratio of variances
1.871795
```

```
> # Librerías necesarias
> library(ggplot2)
> # Datos
> tratamiento <- c("Vermicompost", "Vermicompost", "Vermicompost",
+                 "Compost", "Compost", "Compost")
> mg <- c(0.62,0.63,0.54,0.56,0.54,0.61)
> datos <- data.frame(tratamiento, mg)
> # Crear gráfico de barras con error
> ggplot(datos, aes(x = tratamiento, y = mg, fill = tratamiento)) +
+   stat_summary(fun = mean, geom = "bar", color = "black", width = 0.6) +
+   stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.2) +
+   labs(title = "Contenido de magnesio",
+        y = "mg (%)", x = "Tratamiento") +
+   theme_minimal()
```



Calcio

```
> vermicompost <- c(4.02,3.94,3.81)
> compost <- c(3.12,3.04,2.94)
> shapiro.test(vermicompost)

    Shapiro-wilk normality test

data:  vermicompost
W = 0.98145, p-value = 0.7391

> shapiro.test(compost)

    Shapiro-wilk normality test

data:  compost
W = 0.9959, p-value = 0.8777

> t.test(vermicompost,compost, var.equal= FALSE)

    Welch Two Sample t-test

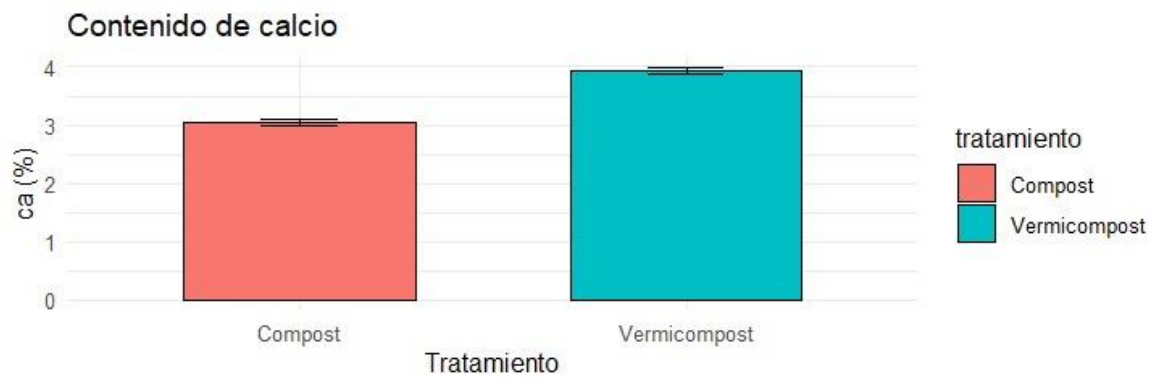
data:  vermicompost and compost
t = 11.077, df = 3.9001, p-value = 0.0004326
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.6646501 1.1153499
sample estimates:
mean of x mean of y
 3.923333  3.033333

> var.test(vermicompost,compost)

    F test to compare two variances

data:  vermicompost and compost
F = 1.3811, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.8399
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.03541404 53.86475410
sample estimates:
ratio of variances
 1.381148

> # Librerías necesarias
> library(ggplot2)
> # Datos
> tratamiento <- c("Vermicompost", "Vermicompost", "Vermicompost",
+                  "Compost", "Compost", "Compost")
> ca <- c(4.02,3.94,3.81,3.12,3.04,2.94)
> datos <- data.frame(tratamiento, ca)
> # Crear gráfico de barras con error
> ggplot(datos, aes(x = tratamiento, y = ca, fill = tratamiento)) +
+   stat_summary(fun = mean, geom = "bar", color = "black", width = 0.6) +
+   stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.2) +
+   labs(title = "Contenido de calcio",
+        y = "ca (%)", x = "Tratamiento") +
+   theme_minimal()
~ |
```



pH

```
> vermicompost <- c(8.8.05,8.26)
> compost <- c(8,7.71,7.54)
> shapiro.test(vermicompost)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  vermicompost
W = 0.88792, p-value = 0.348

> shapiro.test(compost)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  compost
W = 0.97782, p-value = 0.7145

> t.test(vermicompost,compost, var.equal= FALSE)

      welch Two Sample t-test

data:  vermicompost and compost
t = 2.263, df = 3.2523, p-value = 0.1017
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.1224460  0.8291126
sample estimates:
mean of x mean of y
 8.103333  7.750000
```



```
> var.test(vermicompost,compost)
```

F test to compare two variances

```
data: vermicompost and compost
F = 0.35182, num df = 2, denom df = 2, p-value = 0.5205
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.009020965 13.720887246
sample estimates:
ratio of variances
 0.3518176
```

```
> # Librerías necesarias
> library(ggplot2)
> # Datos
> tratamiento <- c("Vermicompost", "Vermicompost", "Vermicompost",
+                  "Compost", "Compost", "Compost")
> ph <- c(8,8.05,8.26,8,7.71,7.54)
> datos <- data.frame(tratamiento, ph)
> # Crear gráfico de barras con error
> ggplot(datos, aes(x = tratamiento, y = ph, fill = tratamiento)) +
+   stat_summary(fun = mean, geom = "bar", color = "black", width = 0.6) +
+   stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.2) +
+   labs(title = "Contenido de pH",
+        y = "ph (%)", x = "Tratamiento") +
+   theme_minimal()
> |
```

