

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR
CARRERA DE AGROPECUARIA



TEMA:

**“APLICACIÓN DE MICROORGANISMOS EN LA DESCOMPOSICIÓN DE
RESIDUOS FLORICOLAS, CANGAHUA-CAYAMBE”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Agropecuario

Línea de investigación: Desarrollo agropecuario y forestal sostenible

AUTOR:

Celeste Jamileth Carrión Castillo

DIRECTOR/A:

MSc. Ima Sumac Sánchez de Cespedes.

Ibarra – febrero 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN

CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE AGROPECUARIA

APLICACIÓN DE MICROORGANISMOS EN LA DESCOMPOSICIÓN DE RESIDUOS FLORÍCOLAS, CANGAHUA-CAYAMBE.

Trabajo de grado revisado por el Comité Asesor, por lo cual se autoriza su presentación como
requisito parcial para obtener Título de:

INGENIERO/A AGROPECUARIO/A

APROBADO:

Lic. Ima Sumac Sánchez de Céspedes

DIRECTOR

FIRMA

PhD. Julia Karina Prado Beltrán

MIEMBRO TRIBUNAL

FIRMA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1752898997		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Carrión Castillo Celeste Jamileth		
DIRECCIÓN:	Ibarra, 23 de febrero		
EMAIL:	cjcarrionc@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	0983603116	TELÉFONO MÓVIL:	0967543235

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	APLICACIÓN DE MICROOEGANISMOS EN LA DESCOMPOSICIÓN DE RESIDUOS FLORÍCOLAS, CANGAHUA-CAYAMBE.
AUTOR (ES):	Celeste Jamileth Carrión Castillo
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	23 de febrero de 2026
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera Agropecuaria
ASESOR /DIRECTOR:	Lic. Ima Sumac Sánchez de Céspedes, MSc. /PhD. Julia Karina Prado Beltrán.

2.- CONSTANCIAS

El autor manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 23 días del mes de febrero de 2026

EL AUTOR:

.....

Celeste Jamileth Carrión Castillo.

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Celeste Jamileth Carrión Castillo, bajo mi supervisión.

Ibarra, a los 23 días del mes de febrero de 2026

Lic. Ima Sumac Sánchez de Céspedes.

DIRECTOR DE TESIS

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Guía: FICAYA-UTN

Fecha: Ibarra, a los 23 días del mes de febrero del 2026

Celeste Jamileth Carrión Castillo “APLICACIÓN DE MICROORGANISMOS EN LA DESCOMPOSICIÓN DE RESIDUOS FLORÍCOLAS, CANGAHUA – CAYAMBE”

/Trabajo de titulación. Ingeniero Agropecuario.

Universidad Técnica del Norte. Carrera de Ingeniería Agropecuaria. Ibarra, a los 23 días del mes de febrero del 2026, 70 páginas

DIRECTOR (A): Lic. Ima Sumac Sánchez de Cespedes, Msc.

El objetivo principal de la presente investigación fue: Evaluar la eficiencia de la inoculación de microorganismos en la elaboración de compost con residuos florícolas en Cangahua – Cayambe.

Entre los objetivos específicos se encuentran:

-Determinar la eficiencia de aplicación de microorganismos en el proceso de compostaje y comparar las características físicas y químicas de los tratamientos en el estudio.

.....
Lic. Ima Sumac Sánchez de Cespedes

Directora de Trabajo de Grado

.....
Celeste Jamileth Carrión Castillo

Autor

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron, de manera directa o indirecta, a la elaboración de este trabajo de investigación. A mis docentes y asesores, por su orientación académica, su rigor metodológico y sus valiosas observaciones, que enriquecieron significativamente el desarrollo de esta tesis. A mi familia, por su constante apoyo, comprensión y respaldo moral durante todo el proceso de formación. Su confianza en mis capacidades ha sido un pilar fundamental para culminar esta etapa académica. A mis compañeros y colegas, cuyas aportaciones, diálogos y experiencias compartidas fortalecieron mi aprendizaje y consolidaron este proyecto. A todos ustedes, mi más sincero reconocimiento y gratitud por su colaboración y acompañamiento.

DEDICATORIA

A mi madre, por ser presencia constante, mi guía silenciosa y mi gran apoyo a lo largo de mi camino académico y personal. Su entrega, paciencia y confianza han sido fundamentales en cada etapa de este proceso. Este trabajo no solo representa un logro académico, sino también el reflejo de su ejemplo, de sus enseñanzas y de todo lo que, con esfuerzo y dedicación, ha sembrado en mí durante muchos años. A usted mamita, le dedico esta tesis con gratitud sincera, profundo respeto y mucho amor, gracias por siempre ser mi gran apoyo en todo este proceso.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO I	19
INTRODUCCIÓN	19
1.1. Antecedentes	19
1.2. Problema de investigación	20
1.3. Justificación	20
1.4. Objetivos	21
1.4.1. Objetivo general.....	21
1.4.2. Objetivos específicos	21
1.5. Hipótesis	21
CAPÍTULO II.....	22
MARCO TEÓRICO.....	22
2.1. Definición de Compostaje.....	22
2.2. Beneficios del compost	23
2.3. Proceso de compostaje.....	23
2.3.1. Fase mesofílica.....	24
2.3.2. Fase termófila o descomposición rápida.....	24
2.3.3. Fase de maduración.....	25
2.4. Elementos que inciden en la dinámica del compostaje.....	26
2.4.1. Humedad.....	26
2.4.2. Balance de relación Carbono y Nitrógeno (C/N).....	26
2.4.3. Temperatura	26
2.4.4. Oxígeno y aireación	27
2.4.5. pH	27
2.5. Elementos que forman parte del compost.....	27
2.5.1. Levaduras.....	27
2.5.2 Actinomicetos	30

2.5.3. Bacterias mesofílicas	31
2.5.4. Hongos mesofílicos.....	32
2.5.5. Microorganismos solubilizadores de fósforo.....	32
2.5.6. Bacterias fijadoras de nitrógeno.....	33
2.5.7. Bacterias Ácido – Lácticas.....	34
2.5.8. Urea Verde	34
2.5.9. Cal dolomita.....	35
2.5.10. Cal agrícola	36
2.6. Tipos de compostaje	37
2.6.1. Pilas de compostaje con ventilación pasiva	37
2.6.2. Compostaje en Cama	37
2.7. Marco legal	38
CAPÍTULO III.....	40
MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
3.1. Descripción del área de estudio	40
3.2. Materiales, insumos y herramientas.....	41
3.3. Métodos	41
3.3.2 Tratamientos	42
3.3.3. Diseño experimental	43
3.3.4 Condiciones del experimento.....	43
3.3.5. Análisis estadístico.....	44
3.3.6 Variables a evaluarse	45
3.4. Manejo del experimento	50
3.4.1. Medición y delimitación de la superficie experimental.....	50
3.4.2. Recolecta y triturado de los residuos florícolas	51
3.4.3. Pretratamiento de la materia prima	52
3.4.4. Preparación de producto para alcanzar la humedad adecuada.....	52
3.4.5. Construcción de pila y camas para desarrollo de compostaje.....	53
3.4.6 Control de los factores de la pila del compostaje	54
3.4.7. Volteos continuos de las pilas de compostaje.....	54
CAPÍTULO IV.....	56

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
4.1. Temperatura	56
4.2. pH	59
4.3. Color	62
4.3.1. Color externo	62
4.3.2. Color interno	62
4.4. Humedad	63
4.5. Olor	66
4.6. Porosidad	67
CAPÍTULO V	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
5.1 CONCLUSIONES	69
5.2 RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fases del compostaje donde se puede observar la sucesión microbiana y ambiental durante todo el proceso	25
Figura 2. Descripción de área de estudio	40
Figura 3. Organización del diseño experimental del estudio.....	43
Figura 4. Evaluación de la variable de temperatura.....	45
Figura 5 Evaluación de la variable de pH.....	46
Figura 6 Análisis de la variable color	47
Figura 7 Análisis de la variable de porosidad.....	49
Figura 8 Análisis de la variable humedad.....	50
Figura 9 Área donde se desarrolla la investigación	51
Figura 10 Recolección de residuos	51
Figura 11 Pretratamiento	52
Figura 12 Pesaje de producto.....	53
Figura 13 Armado de pilas.....	54
Figura 14 Volteo	55
Figura 15 <i>Evolución de la temperatura del compost en función de los días para los tratamientos T1, T2 y T3</i>	58
Figura 16 <i>Temperatura promedio del compost según el lado de medición</i>	59
Figura 17 Variación en el pH entre los tres tratamientos por días.....	61
Figura 18 Variación de la humedad a través de los tres tratamientos y su repetición.	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de las condiciones agroclimáticas del área de estudio donde se evaluaron los microorganismos.....	40
Tabla 2. Recursos materiales, tecnológicos y logísticos empleados en la fase experimental de campo.....	42
Tabla 3. Tratamientos considerados en el estudio y cantidades de insumos utilizados.....	42
Tabla 4 Descripción y distribución de las unidades experimentales por tratamiento y bloque ...	44
Tabla 5 Análisis de varianza ADEVA del efecto de aplicación de microorganismos en residuos florícolas	44
Tabla 6 Evaluación de la tabla de color	47
Tabla 7 Evaluación de la tabla de olor.....	48
Tabla 8 Evaluación de la tabla de porosidad.....	49
Tabla 9 Análisis de la varianza (SC tipo III) de la temperatura del compost	57
Tabla 10 Análisis de varianza de la variable de pH.....	60
Tabla 11 Evaluación estadística de la variable color externo en los tratamientos de compostaje	62
Tabla 12 Evaluación estadística de la variable color interno en los tratamientos.....	63
Tabla 13 ADEVA para la variable de Humedad del estudio	64
Tabla 14 Análisis de independencia para la variable olor con tres niveles de intensidad	66
Tabla 15 Análisis de independencia para la variable porosidad clasificada en niveles de evaluación	68

APLICACIÓN DE MICROORGANISMOS EN LA DESCOMPOSICIÓN DE RESIDUOS FLORÍCOLAS, CANGAHUA-CAYAMBE

Celeste Jamileth Carrión Castillo

Universidad Técnica del Norte

Correo: cjcarrionc@utn.edu.ec

RESUMEN

El compostaje, mediante la inoculación de bacterias y hongos beneficiosos, permite una descomposición eficiente y controlada, generando abono orgánico de calidad. Esta práctica mejora las propiedades del suelo y disminuye los efectos negativos sobre el medio ambiente de los desechos agrícolas. El estudio se realizó en Mystic Flowers (Cangahua, Cayambe) a fin de evaluar la eficacia de microorganismos en el compostaje de residuos florícolas. Se aplicaron tres tratamientos: pilas con ventilación pasiva (T1), método de la finca (T2) y testigo (T3), aplicando un esquema de bloques distribuidos de forma aleatoria. Se analizaron variables como temperatura, pH, color, olor, humedad y porosidad. El proceso incluyó triturado de residuos, aplicación de inoculantes, armado de pilas, monitoreo y volteos. El análisis estadístico se efectuó con InfoStat, aplicando el test de diferencia mínima significativa de Fisher al 5 % de error. Durante el compostaje, se observaron diferencias significativas en temperatura y humedad ($p < 0.0001$), con mejores resultados en T2 para temperatura y T1 en humedad, indicando mayor actividad microbiana. El color externo e interno también mostró diferencias significativas ($p < 0.0001$), evidenciando mayor humificación. Aunque el pH no varió entre tratamientos ($p = 0.2040$), sí lo hizo entre réplicas ($p < 0.0001$). El olor presentó diferencias significativas ($p = 0.0002$), siendo de baja intensidad en general. La porosidad no presentó diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.3751$), aunque fue más heterogénea en T1. Por lo que puede señalar que la inoculación microbiana optimizó el compostaje de residuos florícolas, destacando el tratamiento T2 por su mayor eficiencia en la descomposición y calidad del abono final.

Palabras clave: compostaje, inoculación, bacterias, hongos, actividad microbiana.

APPLICATION OF MICROORGANISMS IN THE DECOMPOSITION OF FLORAL WASTES, CANGAHUA-CAYAMBE,

Celeste Jamileth Carrión Castillo.

Technical University of the North

Correo: cjcarrionc@utn.edu.ec

ABSTRACT

Composting, through the inoculation of beneficial bacteria and fungi, allows for efficient and controlled decomposition, generating quality organic fertilizer. This practice improves soil properties and reduces the negative environmental impacts of agricultural waste. The study was conducted at Mystic Flowers (Cangahua, Cayambe) to evaluate the effectiveness of microorganisms in composting flower waste. Three treatments were applied: passively ventilated piles (T1), the farm method (T2), and a control (T3), using a randomly distributed block scheme. Variables such as temperature, pH, color, odor, humidity, and porosity were analyzed. The process included waste shredding, inoculant application, pile assembly, monitoring, and turning. Statistical analysis was performed with InfoStat, using Fisher's least significant difference test with a 5% error rate. During composting, significant differences in temperature and humidity were observed ($p < 0.0001$), with better results in T2, indicating greater microbial activity. External and internal color also showed significant differences ($p < 0.0001$), evidencing greater humification. Although pH did not vary between treatments ($p = 0.2040$), it did vary between replicates ($p < 0.0001$). Odor presented significant differences ($p = 0.0002$), being generally low in intensity. Porosity did not present statistically significant differences ($p > 0.3751$), although it was more heterogeneous in T1. Therefore, it may indicate that microbial inoculation optimized the composting of flower waste, with treatment T2 standing out for its greater efficiency in decomposition and quality of the final fertilizer.

Key words: composting, inoculation, bacteria, fungi, waste, microbial activity

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En tiempos recientes, la industria florícola se ha consolidado como un sector robusto y en constante crecimiento. Es reconocido como una fuente clave de ingresos en países con alto y mediano nivel de desarrollo. La floricultura juega un rol clave en el desarrollo económico y social, ya que contribuye significativamente a la generación de divisas para el país (Manotoa-Mejia et al., 2022).

Según el estudio de Idrovo (2020), en Ecuador, la creciente demanda de la industria florícola, especialmente en la producción de rosas, ha generado una considerable cantidad de residuos vegetales, como los tallos, hojas y pétalos, derivados del proceso de corte y postcosecha. Estos residuos, lejos de ser un desperdicio, pueden ser aprovechados como materia prima valiosa, ya que su composición incluye compuestos como lignina, proteínas, almidones y aminoácidos, elementos que los microorganismos utilizan para generar productos útiles. Uno de los aportes más significativos de estos desechos, es que pueden ser transformados en compost, un recurso fundamental para el acondicionamiento de cultivos y fertilidad del suelo, contribuyendo así un manejo sostenible de los recursos en la agricultura.

Chávez y Tréboles (2023) observaron que los residuos florícolas contienen niveles elevados de compuestos básicos como nitrógeno, fósforo y potasio, constituyendo una fuente valiosa de materia orgánica para la producción de compost. El proceso de compostaje, monitorizado durante varias semanas, arrojó resultados positivos en cuanto a la calidad de abono obtenido, demostrando que estos residuos pueden transformarse eficazmente en un compost de alta calidad. Además, le confieren una mejora significativa a la estructura del suelo, así como un aumento en su capacidad para retener nutrientes.

Garzón et al. (2022) señalan que el compost elaborado con residuos florícolas de *Dianthus* spp. y girasol (*Helianthus annuus* L.) mejoró las propiedades del sustrato, disminuyendo la densidad aparente e incrementando la porosidad, lo que favoreció la estructura física del suelo. Además, aumentó el contenido de carbono orgánico y la actividad microbiana, destacándose el incremento de microorganismos solubilizadores de fosfato y fijadores de nitrógeno, mejorando la

disponibilidad de nutrientes. Esto demuestra que el compostaje de residuos florícolas mejora la fertilidad del suelo y promueve la sostenibilidad agrícola.

1.2. Problema de investigación

En los últimos años, el cantón Cayambe, en la parroquia de Cangahua, ha experimentado un crecimiento económico en los sectores comerciales, productivos y de servicio. Este avance ha impulsado el progreso socioeconómico, pero ha generado problemas ambientales, especialmente relacionados con la gestión inadecuada de los desechos sólidos. Actualmente, la actividad florícola produce tres toneladas de basura diarias, y el sistema de clasificación, organización y disposición final de estos desechos es deficiente, lo que impacta negativamente en la conservación del medio ambiente (Bone, 2023).

Según Santos (2021), el manejo incorrecto de los residuos vegetales puede ocasionar varios efectos adversos sobre el medio ambiente, afectando recursos naturales que son esenciales como el agua, suelo y aire. Además, puede tener repercusiones en la salud humana y deteriorar la belleza de la naturaleza. Sin embargo, al considerar los residuos como una oportunidad y explorar métodos y soluciones para su aprovechamiento adecuado, es posible mitigar estos impactos negativos y promover la protección del entorno en el que vivimos.

Garay-Peralta et al. (2022) señalan que el uso desmedido de productos químicos ha causado la degradación de los suelos agrícolas, reduciendo su fertilidad y capacidad biológica. Los agricultores recurren a manejos que perjudican la calidad del terreno, y las consecuencias de estas acciones se hacen evidentes con el tiempo. Los rendimientos agrícolas van en descenso debido a la aplicación excesiva de químicos, sin considerar los umbrales económicos que indican el momento adecuado y las dosis necesarias para su utilización.

1.3. Justificación

Jaimes-Díaz et al. (2021) destacan que el compostaje es un proceso biológico que convierte los residuos orgánicos en un recurso valioso, reduciendo la cantidad de desechos y mejorando la fertilidad del suelo. Al enriquecerlo con nutrientes esenciales y microorganismos benéficos, mejora la estructura edáfica, aumenta la retención de agua y optimiza la absorción de compuestos nutritivos esenciales, favoreciendo la sostenibilidad y estructura del suelo a largo plazo.

Garzón et al. (2022) mencionan que el compost elaborado con residuos florícolas tiene un gran potencial para mejorar suelos ácidos. Su uso, combinado con fertilizantes inorgánicos, optimiza propiedades fundamentales del campo como el pH, la acidez intercambiable, la disponibilidad de fósforo, la materia orgánica y las relaciones C/N y C/P. Los cuales han contribuido a una mejora significativamente en la fertilidad del suelo, favoreciendo un medio más apropiado para el desarrollo de las siembras y promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles.

En la investigación de Gama (2024), se demostró que, al incorporar microorganismos para acelerar los procesos de descomposición, no solo se garantiza el reciclaje eficiente de la materia orgánica, sino también se favorece la liberación de macro y microelementos esenciales. Esto es crucial para optimizar la absorción de nutrientes, y favorecer el desarrollo saludable de las plantas y mejorar la calidad del sustrato.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de la inoculación de microorganismos en la elaboración de compost con residuos florícolas en Cangahua – Cayambe.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la eficiencia de la aplicación de microorganismos en el proceso de compostaje.
- Comparar las características físicas y químicas de los tratamientos en estudio.

1.5. Hipótesis

H₀: La inoculación de microorganismos no influye en la elaboración de compost.

H_a: La inoculación de microorganismos influye en la elaboración de compost.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Definición de Compostaje

Según el manual de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2013), el compostaje es un proceso en el que los desechos orgánicos, como sobras de alimentos y plantas, se descomponen con la ayuda de microorganismos y lombrices, transformándose en un abono natural rico en nutrientes. Esta técnica mejora el suelo, reduce la basura y es una forma ecológica de reciclar, utilizando una mezcla de materiales verdes (frutas y verduras) y hojas secas.

Para Garzón et al. (2022) el compost es un insumo que aporta materia orgánica al suelo, modificando las propiedades físicas como la estructura, la agregación y la densidad. Además, favorece el movimiento de agua, aire y calor, y mejora tanto la capacidad de intercambio catiónico como la función tampón del suelo. Por ello, su uso se orienta principalmente a la mejora y acondicionamiento de los sustratos.

El compostaje se produce por medio de la degradación anaerobia de material orgánico por acción de microorganismos en un ambiente controlado. Con este proceso se obtiene un producto húmedo y rico en materia orgánica que aporta al suelo carbono, nitrógeno, energía, sustancias húmicas y minerales (Idrovo, 2020).

En este contexto, el compostaje se perfila como una práctica que permite transformar residuos orgánicos en un producto útil para la agricultura y el manejo sostenible del suelo. A través de procesos biológicos controlados, los restos de alimentos, hojas secas y otros materiales vegetales se descomponen hasta convertirse en un abono rico en nutrientes. Este producto mejora la estructura del suelo, favorece la agregación de partículas, reduce la compactación y optimiza el flujo de agua, aire y calor. Además, contribuye a incrementar su capacidad para retener y liberar nutrientes, así como su potencial de amortiguación frente a cambios químicos. El resultado es un suelo más fértil, equilibrado y apto para diversos usos agrícolas, lo que convierte al compostaje en una herramienta clave para la gestión ambiental y la producción limpia (Jaimes-Díaz et al., 2021).

2.2. Beneficios del compost

El compostaje tiene múltiples beneficios para el suelo. Gracias a su textura suelta, favorece la conformación de estructuras agregadas en el terreno, mejorando tanto la aireación como la retención de agua. Al ser un producto natural y libre de químicos, el compost contribuye significativamente a la sanidad del suelo, mejorando su calidad y disminuyendo la presencia de patógenos. Además, posee propiedades bactericidas y fungicidas que fuerzan aún más el bienestar del suelo (Garzón et al., 2022).

Gracias a la textura suelta del compostaje, este favorece la conformación de estructuras agregadas en el terreno, mejorando tanto la aireación como la retención de agua. Al ser un producto natural y libre de químicos, contribuye a la sanidad del suelo, mejorando su calidad y disminuyendo la presencia de patógenos. Además, posee propiedades bactericidas y fungicidas que fuerzan aún más el bienestar del suelo. Al mejorar la estructura, facilita procesos esenciales como la aireación, la infiltración de agua y el desarrollo radicular. Esta mejora física se traduce en una mayor capacidad del suelo para retener humedad y resistir la erosión, aspectos fundamentales en zonas agrícolas con alta variabilidad climática.

Además de mejorar la estructura y la salud del suelo, el compost también impacta positivamente en los nutrientes de las plantas. Su elevada proporción de nutrientes y macronutrientes lo perfilan como un excelente fertilizante, promoviendo el crecimiento saludable de las plantas. Otra ventaja es su rentabilidad, ya que no es necesario comprarlo; se puede producir fácilmente mediante un proceso sencillo y económico (FAO, 2013).

2.3. Proceso de compostaje

Para FAO (2013), el compostaje es la descomposición de residuos orgánicos mediante procesos biológicos en presencia de oxígeno, que mejora el suelo y aporta nutrientes. Sin embargo, para que el producto final cumpla con estas funciones, es indispensable que el proceso se complete de manera adecuada, siguiendo cada una de sus fases de desarrollo.

Según Gutiérrez-González et al. (2024), el proceso de compostaje permite la transformación progresiva de la materia orgánica hasta alcanzar un compost estable y útil para el suelo, a través de las siguientes fases:

2.3.1. Fase mesofílica

Es la etapa del compostaje en la que actúan microorganismos que trabajan a temperaturas moderadas (15-45 °C). Al inicio, estos organismos descomponen los residuos más fáciles de transformar y generan calor, lo que eleva la temperatura del material. Esta fase también ocurre al final del proceso, cuando la temperatura baja y continúa la descomposición de restos más complejos. Es clave para iniciar y completar el compostaje con una duración de 2 a 8 días (Cancio, 2024) (Figura 1).

2.3.2. Fase termófila o descomposición rápida

Esta etapa del compostaje, denominada fase termófila o de rápida descomposición, representa un momento fundamental dentro del proceso de transformación de materiales orgánicos. En esta fase los microorganismos comienzan a actuar sobre los compuestos más fácilmente degradables, como las azúcares, ácidos orgánicos y proteínas simples, lo que provoca un notable incremento en la temperatura del material compostado (Noor et al., 2024).

Este aumento térmico, que suele superar los 55 °C, resulta crucial tanto para acelerar la degradación como para higienizar el producto, ya que contribuye a la eliminación de agentes patógenos y la inactivación de semillas de especies de plantas no deseadas. No obstante, es necesario evitar que la temperatura supere los 70-75 °C, ya que este exceso térmico puede afectar negativamente la actividad biológica ralentizando o incluso deteniendo el proceso (Jaimes-Díaz et al., 2021).

La duración de esta etapa puede variar entre varias semanas y más de un mes, y está condicionada por varios factores. En primer lugar, la composición del material influye directamente en la velocidad de descomposición, tomando en cuenta que los residuos ricos en nitrógeno, se degradan con mayor rapidez, mientras que los materiales con alto contenido de lignina o celulosa, requieren más tiempo para desintegrarse (Pardo-Díaz et al., 2024).

En segundo lugar, las condiciones ambientales son decisivas, ya que la temperatura, la humedad y la aireación regulan la actividad microbiana, un ambiente cálido y húmedo favorece la acción de los microorganismos, mientras que la falta de oxígeno o un exceso de agua puede ralentizar el proceso. Finalmente, el método técnico aplicado también condiciona la duración. Sistemas intensivos con volteo frecuente y control de parámetros aceleran la maduración del

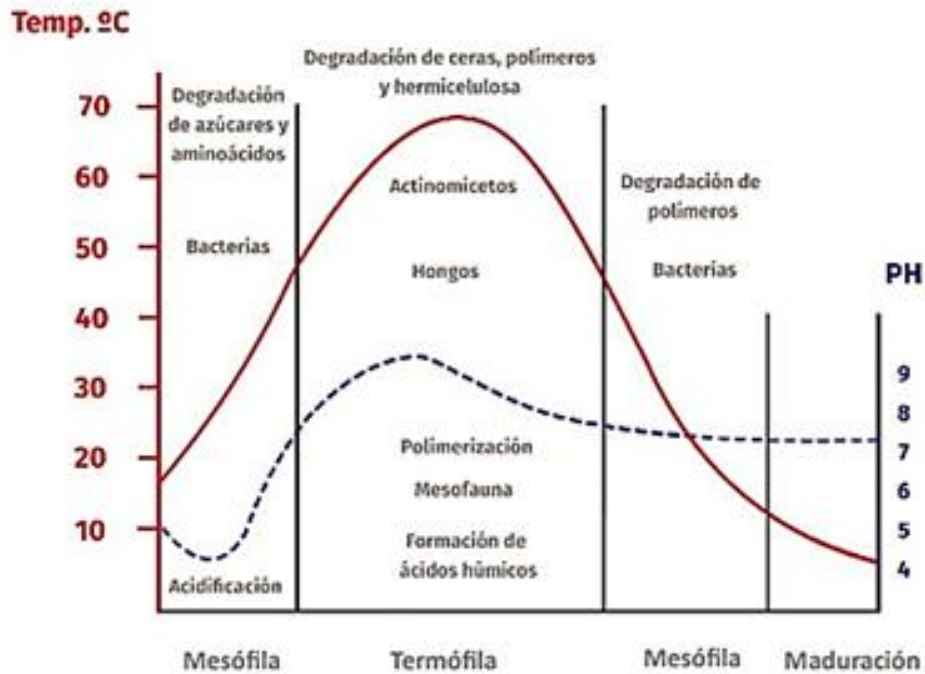
compost, mientras que métodos más tradicionales o pasivos prolongan el tiempo necesario para obtener un producto estable (Acuña y Paredes, 2020) (Figura 1).

2.3.3. Fase de maduración

Consiste en el curado del compost y ocurre tras el descenso irreversible de la temperatura posterior a la etapa de termófila. En esta fase intervienen microorganismos mesofílicos, que actúan a temperaturas moderadas (15-35 °C) y continúan la descomposición hasta alcanzar temperatura ambiente, enfocándose en compuestos orgánicos complejos como la celulosa, lignina y almidón. Los actinomicetos tienen un rol clave en este proceso, ya que contribuyen a la formación de sustancias húmicas. Aunque más lenta, esta etapa es esencial para estabilizar el compost y garantizar su calidad como enmienda orgánica segura para (Tola et al., 2024) (Figura 1).

Figura 1

Fases del compostaje donde se puede observar la sucesión microbiana y ambiental durante todo el proceso



Nota: la línea azul punteada corresponde a la variación del pH

Fuente: Puntocompost (s.f.)

2.4. Elementos que inciden en la dinámica del compostaje

Basado en la revisión de Gutiérrez-González et al. (2024), a continuación, se señalan los principales factores que afectan el desarrollo adecuado del compostaje.

2.4.1. Humedad

Es un parámetro clave en el compostaje, ya que influye directamente en la actividad microbiana y en la estructura física del sustrato. Niveles óptimos se consideran entre 50 % y 70 % de humedad y son los que favorecen procesos aeróbicos eficientes. Valores por debajo del 40% reducen la actividad biológica y la temperatura, mientras que excesos superiores a 70% inducen condiciones anaeróbicas, generando compuestos indeseables como sulfuros y ácidos orgánicos (Pardo-Díaz et al., 2024).

En compostaje de mortalidades, generalmente no se requiere adición de agua debido a la alta liberación de líquidos por los tejidos en descomposición, salvo cuando se emplean materiales estructurantes con humedad muy baja. Se humedecen los cadáveres en los casos de que se requiera aumentar de 40 % la humedad (Muñoz et al., 2025).

2.4.2. Balance de relación Carbono y Nitrógeno (C/N)

La relación C/N es clave para la estabilidad del compostaje, ya que regula el equilibrio nutricional microbiano. Valores óptimos entre 25:1 y 30:1 favorecen una degradación eficiente y sin olores. Relaciones elevadas ralentizan el proceso por déficit de nitrógeno, mientras que relaciones bajas (<15:1) generan pérdidas por volatilización de amoníaco (Gutiérrez-González et al; 2024).

2.4.3. Temperatura

Durante el compostaje, el incremento térmico es un parámetro esencial en la actividad microbiana y de la eficiencia del proceso. Mientras los microbios degradan los residuos orgánicos bajo condiciones aeróbicas, se genera calor, elevando gradualmente la temperatura del sistema.

La fase termofílica, comprendida entre 50 °C y 75 °C, representa el punto de máxima actividad biológica. En esta fase llamada de higienización, se comienzan a inhibir ciertos grupos microbianos, dando paso a la fase de enfriamiento. La retención de calor depende de un adecuado apilamiento y aislamiento del sustrato, mientras que una aireación oportuna permite disipar

excesos térmicos y mantener condiciones óptimas para la biotransformación (Gutiérrez-González et al., 2024).

2.4.4. Oxígeno y aireación

La aireación es un componente esencial del compostaje, ya que las bacterias aeróbicas responsables de la descomposición requieren un suministro constante de oxígeno. Este proceso no solo regula la concentración de este gas, sino que también influye en variables clave como la humedad, la temperatura y la evacuación de gases tóxicos como el CO₂. La demanda de O₂ es más alta durante las primeras etapas, cuando la actividad microbiana es máxima. Para mantener una aireación eficiente, es fundamental considerar el tamaño de partícula del material, en sistemas de gran volumen, puede ser necesaria la implementación de ventilación forzada. Además, la elección de materiales debe equilibrar la relación C:N (Vandecasteele, 2023).

2.4.5. pH

El compostaje de residuos de mortalidad requiere un pH cercano a la neutralidad (6-9), ya que valores extremos afectan la actividad microbiana. La mezcla adecuada de materiales carbonados y nitrogenados lo estabiliza y reduce la pérdida de nitrógeno. Esta técnica, económica y segura, permite transformar desechos vegetales en un fertilizante útil, siempre que controlen parámetros clave como temperatura, humedad, aireación y concentración de hidrogeniones. Nuevas tecnologías, como reactores e inoculantes, buscan mejorar la eficiencia del proceso y reducir su duración (Tola et al., 2024).

2.5. Elementos que forman parte del compost

2.5.1. Levaduras

Las levaduras son microorganismos unicelulares que forman parte de la comunidad microbiana involucrada en la formación del compostaje. Durante la degradación de los residuos orgánicos, las levaduras contribuyen a la fermentación y descomposición de azúcares y otros compuestos orgánicos, facilitando la transformación de los residuos en compost maduro. Su actividad es primordial en las etapas iniciales del compostaje, donde predominan condiciones relativamente húmedas y con disponibilidad de nutrientes sencillos (Angulo y Lizonde, 2020).

Estos microorganismos son esenciales en los procesos biogeoquímicos al intervenir en la descomposición de compuestos orgánicos simples, como los azúcares que son transformados en

sustancias más estable. A través de este mecanismo, estos elementos se convierten en minerales disponibles para el suelo, favoreciendo el reciclaje de nutrientes y asegurar la continuidad de los ciclos naturales en diversos ecosistemas.

Su actividad es especialmente relevante en entornos con alta carga de residuos vegetales, como suelos, hojarasca y sistemas de compostaje. En estos ambientes, participan tanto en la fermentación como en la respiración celular, procesos mediante los cuales transforman los carbohidratos en dióxido de carbono, etanol y otros metabolitos, contribuyendo directamente al ciclo del carbono. Además, establecen interacciones sinérgicas con bacterias, hongos filamentosos y actinobacterias, lo que potencia la eficiencia en la degradación de residuos orgánicos.

Algunas especies también son capaces de sintetizar metabolitos secundarios de importancia ecológica e industrial, como enzimas, ácidos orgánicos y vitaminas del complejo B. En ciertos casos, mantienen relaciones simbióticas con insectos, favoreciendo procesos digestivos y mecanismos de defensa frente a patógenos. Finalmente, su valor nutricional como fuente de proteínas, lípidos y micronutrientes las posiciona como componentes clave en las redes tróficas microbianas del suelo (Hernández-Saavedra, 2021).

Las levaduras son hongos unicelulares presentes en una amplia variedad de ambientes naturales, incluyendo suelos, residuos orgánicos y plantas en descomposición. Aunque su protagonismo en el compostaje ha sido menor frente a bacterias y hongos filamentosos, diversos estudios demuestran su aporte significativo en la descomposición de materia orgánica, especialmente en residuos con alto contenido de azúcares o grasas (Hernández-Saavedra, 2021).

2.5.1.1. Levaduras fermentadoras

Saccharomyces cerevisiae L. es ampliamente reconocida por su capacidad para fermentar azúcares simples, generando calor y promoviendo el aumento de temperatura en las pilas de compost. Investigaciones recientes han demostrado que la inoculación con *S. cerevisiae* L. en residuos alimentarios acidificados eleva la temperatura de las pilas entre 4° C y 14 °C, acelera la fase termofílica y reduce las emisiones de amoníaco, mejorando así la eficiencia del compostaje (Yi et al., 2024).

De manera complementaria, un estudio desarrollado por Mullisaca et al. (2023) con residuos vegetales demostró que la adición de *S. cerevisiae* L. no solo disminuye el tiempo total

de compostaje, sino que también mejora la calidad del producto final. Las pilas inoculadas alcanzaron una mayor humificación y mejores características fisicoquímicas respecto al tratamiento sin levadura, lo cual confirma la capacidad de *S. cerevisiae* L. para estimular la actividad microbiana responsable de la transformación del material. Resultados similares fueron reportados por Acuña y Paredes (2020) en un programa institucional de compostaje, donde el uso de esta levadura aceleró notablemente la descomposición de los residuos y permitió obtener un compost estable en menor tiempo, posicionándose como una alternativa eficaz y accesible para el manejo sostenible de desechos orgánicos.

2.5.1.2. Levaduras ambientales y resistentes

Las denominadas levaduras ambientales y resistentes comprenden especies capaces de sobrevivir y mantenerse activas bajo condiciones de estrés propias de los ecosistemas naturales y de los procesos biotecnológicos. Estas levaduras suelen tolerar temperaturas elevadas, variaciones drásticas de pH, alta concentración de ácidos orgánicos, escasez de nutrientes y fluctuaciones de humedad, condiciones frecuentes en los residuos orgánicos destinados al compostaje. Gracias a esta resiliencia fisiológica, desempeñan un papel relevante en la degradación inicial de los materiales y en la estabilización del proceso.

Especies como *Pichia kudriavzevii* Boidin, Pignal & Besson, han mostrado una notable eficacia en la degradación de ácidos orgánicos durante las primeras etapas del compostaje debido a su alta tolerancia térmica y a su capacidad para metabolizar compuestos inhibidores. Un estudio reportó que mantener la temperatura en 40 °C durante dos días favorece significativamente la actividad de *P. kudriavzevii*, reduciendo la acumulación de ácido acético y promoviendo una degradación más eficiente de los residuos orgánicos (Noor et al., 2024). Estos resultados evidencian su potencial como microorganismo robusto en procesos de biotransformación y compostaje en escenarios ambientales exigentes.

2.5.1.3. Diversidad de levaduras en el compostaje

El estudio no solo identificó las especies presentes durante el proceso de compostaje, sino que también describió las funciones ecológicas que desempeñan dentro de la sucesión microbiana. En las primeras etapas, especies como *Candida tropicalis*, *Debaryomyces hansenii* y *Rhodotorula mucilaginosa* actúan como levaduras pioneras, capaces de tolerar elevadas concentraciones de

azúcares simples, ácidos orgánicos y cambios bruscos de temperatura. Su actividad metabólica contribuye a la hidrólisis inicial de compuestos fácilmente degradables, liberando energía y calor que impulsan la fase de calentamiento del compost.

A medida que avanza el proceso, estas levaduras participan en la estabilización del pH, la degradación de alcoholes, la reducción de ácido acético y la transformación de compuestos intermedios que podrían inhibir el microbiota bacteriano. En las etapas tardías del compostaje, especies oportunistas como *Candida parapsilosis* permanecen activas debido a su capacidad de crecer en ambientes más secos y con menor disponibilidad de nutrientes, contribuyendo a la degradación de residuos recalcitrantes y al mantenimiento de la actividad en condiciones menos favorables. Estos hallazgos demuestran que la diversidad de levaduras no es únicamente taxonómica, sino funcional: cada especie participa de forma diferenciada en la sucesión microbiana, la estabilidad del proceso y la calidad final del compost (Glushakova & Kachalkin, 2023).

2.5.1.4. Interacciones microbianas y humificación

Durante la fase termofílica del compostaje, las levaduras, especialmente las pertenecientes a la familia Saccharomycetaceae, desempeñan un rol fundamental en la mineralización y humificación de los residuos orgánicos. Estudios recientes han demostrado que la comunidad fúngica, dominada por géneros como *Pichia* y *Candida*, mantiene una estructura estable y compleja, superando en estabilidad a las comunidades bacterianas, y facilitando la formación de ácidos húmicos (Zhu et al., 2024).

2.5.2 Actinomicetos

Son microorganismos filamentosos del orden Actinomycetales, caracterizados por su capacidad para degradar compuestos orgánicos complejos como celulosa, hemicelulosa y lignina. Durante el compostaje, especialmente en las fases termofílica y de maduración, estos microorganismos contribuyen significativamente a la estabilidad de la materia orgánica y a la producción de metabolitos bioactivos con propiedades antimicrobianas. Estudios recientes han destacado su rol en la optimización de la calidad del compost y del suelo (Ngamcharungchit et al., 2023).

Los actinomicetos son bacterias Gram positivas con morfología filamentosa, similares a los hongos en su forma de crecimiento. Presentan una estructura micelial confirmada que puede fragmentarse en esporas o células individuales. Este micelio puede dividirse en dos tipos: micelio vegetativo, que crece dentro del sustrato, y micelio aéreo, que se desarrolla en la superficie y forma esporas (Topatan y Kati, 2022).

Las colonias de actinomicetos en medio de cultivo suelen ser terrosas, de aspecto seco o pulverulento, con pigmentación variable (blanca, gris, rosada o parda), dependiendo del género y las condiciones del medio. Su tamaño celular es intermedio entre bacterias y hongos, y su crecimiento lento les permite dominar en ambientes donde otros microorganismos no prosperan fácilmente (Parada, 2021).

Los actinomicetos corresponden al Phylum Actinomycetota, clase Actinomycetes, orden Actinomycetales, el cual agrupa varios géneros de importancia ambiental, médica y agrícola. Según Pérez-Corral et al. (2022) entre los géneros más relevantes en compostaje y suelos se encuentran:

- *Streptomyces*: El género más conocido, responsable de la producción de más del 70 % de los antibióticos naturales conocidos.
- *Actinomyces*: Común en ambientes anaerobios o microaerófilos.
- *Micromonospora*: Asociado a ambientes acuáticos y suelos húmedos.
- *Thermomonospora* y *Thermobifida*: Termófilos importantes en la fase termofílica del compostaje.

La clasificación moderna de los actinomicetos se basa en características moleculares, especialmente en la secuenciación del gen 16S rRNA, lo que ha permitido redefinir relaciones filogenéticas entre sus grupos y descubrir nuevas especies como funciones específicas en la transformación del carbono y la producción de compuestos bioactivos (Pérez-Corral et al., 2022).

2.5.3. Bacterias mesofílicas

Las bacterias mesofílicas están presentes de forma generalizada en entornos naturales y son fundamentales en procesos como la fermentación, la degradación de los residuos orgánicos en el compostaje y la depuración de aguas residuales. Además, muchas bacterias patógenas para

humanos pertenecen a este grupo, dado que el cuerpo humano proporciona un ambiente térmico ideal para su crecimiento (Tola et al., 2024).

Las bacterias mesofílicas son fundamentales en la primera fase del compostaje, al descomponer rápidamente la materia orgánica más simple y elevar la temperatura del sustrato. Este incremento térmico favorece la eliminación de organismos patógenos, contribuyendo a la seguridad sanitaria del compostaje. Además, su acción inicial prepara el ambiente para la actividad de bacterias termofílicas, facilitando un proceso de compostaje más eficiente y seguro (Chopkova et al., 2023).

2.5.4. Hongos mesofílicos

Los hongos mesofílicos son microorganismos fúngicos que crecen óptimamente en rangos de temperatura moderada, generalmente entre 20 °C y 45 °C, con una temperatura óptima cercana a los 30 °C. Estos hongos cumplen una función clave en el proceso de transformación de los compuestos orgánicos, especialmente durante las primeras etapas del compostaje, ya que degradan elementos complejos como celulosa, hemicelulosa y lignina. Además, su presencia contribuye a la formación de humus, mejorando los agregados del suelo y la absorción de nutrientes. Se encuentran comúnmente en suelos, residuos agrícolas, pilas de compost, y su actividad está asociada a ambientes con buena aireación y humedad adecuada (Zhao et al., 2022).

Los hongos mesofílicos son esenciales en la fase inicial del compostaje, ya que tienen la capacidad de degradar compuestos orgánicos complejos como la celulosa, hemicelulosa y lignina, que las bacterias no descomponen fácilmente. Esta actividad acelera el proceso de descomposición y mejora la formación de humus. Además, estos hongos contribuyen a estabilizar el pH y promueven condiciones favorables para la actividad microbiana sucesiva, facilitando la transición hacia la fase termofílica. Su presencia también está relacionada con una mejor calidad del compost final (Zhao et al., 2022).

2.5.5. Microorganismos solubilizadores de fósforo

Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF) son bacterias, hongos o actinomicetos capaces de transformar el fósforo soluble presente en el suelo o en materiales orgánicos en formas disponibles para las plantas, como los iones fosfato. Este proceso ocurre principalmente a través de la síntesis de ácidos orgánicos, como ácido cítrico o glucónico, que

disminuye el pH dentro del entorno y liberan el fósforo de compuestos minerales u orgánicos complejos. Estos microorganismos son fundamentales en la mejora de la fertilidad del suelo, la eficiencia del compost como biofertilizante y la reducción del uso de fertilizantes químicos (Rawat et al., 2021).

Durante el proceso de descomposición, estos microorganismos transforman el fósforo soluble presente en residuos orgánicos, en formas fácilmente asimilables, como el ortofosfato. Esto enriquece el compost y mejora su valor como biofertilizante natural. Además, la acción de los MSF contribuye a la madurez y estabilidad del producto, promoviendo un microbiota beneficioso y reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos sintéticos. Por ello su presencia mejora tanto la calidad agronómica como su sostenibilidad en sistemas agrícolas ecológicos (Rawat et al., 2021).

2.5.6. Bacterias fijadoras de nitrógeno

Las bacterias fijadoras de nitrógeno son microorganismos capacitados para transformar el nitrógeno atmosférico (N_2), que es inerte e inaccesible para la mayoría de los organismos, en compuestos nitrogenados como el amonito (NH_4^+) que pueden ser aprovechados por las plantas. Este proceso, conocido como fijación biológica de nitrógeno (FBN), es esencial para el sostenimiento de la productividad del suelo y el crecimiento vegetal en sistemas agrícolas sostenibles. Estas bacterias pueden ser libres en el suelo como las especies de los géneros *Azotobacter* y *Clostridium* o simbióticas, formando asociaciones con raíces de leguminosas como *Rhizobium* spp. En el compostaje, su presencia contribuye al enriquecimiento del nitrógeno total del compost, mejora su valor como biofertilizantes y favorece la actividad microbiana durante la descomposición (Vats et al., 2021).

Las bacterias fijadoras de nitrógeno cumplen un papel fundamental en el compostaje al contribuir con la incorporación de nitrógeno biológicamente disponible al sustrato. Este elemento es fundamental para el crecimiento de las plantas y para mantener el equilibrio carbono/nitrógeno (C/N) durante el proceso de descomposición. Su actividad favorece una descomposición más eficiente de la materia orgánica y mejora la calidad nutricional del compost final. Además, estas bacterias ayudan a compensar las pérdidas de nitrógeno por volatilización durante la fase termofílica del compostaje, enriqueciendo el producto final con compuestos nitrogenados que promueven el crecimiento vegetal. Por ello su presencia en el compost no solo perfecciona la

productividad del suelo, además fortalece el enfoque agroecológico al reducir la dependencia de fertilizantes químicos (Alomari et al., 2024).

2.5.7. Bacterias Ácido – Lácticas

Las bacterias ácido-lácticas, también llamadas BAL constituyen un conjunto de bacterias Gram-positivas, no esporuladas, aerotolerantes o anaerobias facultativas, que forman ácido láctico como compuesto predominante de la fermentación de los carbohidratos. Estos microorganismos pertenecen principalmente a los géneros *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Pediococcus*, *Leuconostoc* y *Streptococcus*. En el compostaje las BAL contribuyen a la acidificación del medio en etapas iniciales, lo que favorece el control de microorganismos patógenos y acelera la descomposición de materia orgánica fácilmente fermentable. También ayudan a estabilizar el pH, promover la actividad microbiana beneficiosa y mejorar la calidad microbiológica del compost (Kong et al., 2023).

Las bacterias ácido lácticas desempeñan un rol clave durante las primeras fases del compostaje, ya que favorecen la fermentación de azúcares simples presentes en la materia orgánica produciendo ácido láctico que reduce el pH del sustrato. Esta acidificación temporal ayuda a inhibir microorganismos patógenos y crear un ambiente propicio para el establecimiento de otras especies de bacterias benéficas. Además, las BAL contribuyen a mejorar la calidad microbiológica del compost, promueven la estabilidad del proceso y pueden actuar como bioinoculantes al potenciar la actividad enzimática y acelerar la degradación de compuestos orgánicos. Su acción también ayuda a controlar olores y a reducir la emisión de compuestos nitrogenados volátiles, lo que favorece un compostaje más eficiente y sostenible (Kong et al., 2023).

2.5.8. Urea Verde

La urea verde es una forma de urea producida a partir de fuentes renovables, principalmente mediante el uso de hidrógeno verde generado con energía limpia (solar o eólica) a través de electrólisis, en lugar de utilizar gas natural como ocurre en la urea convencional. Aunque químicamente es igual ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), su fabricación con bajas emisiones de carbono la convierte en una alternativa más sostenible para la agricultura y el manejo de residuos orgánicos (Aliahmad et al., 2023).

En el proceso de compostaje, la urea verde desempeña un papel relevante como fuente adicional de nitrógeno mineral fácilmente asimilables por los microorganismos. Su aplicación permite ajustar la relación carbono /nitrógeno (C/N), especialmente cuando se trabaja con residuos ricos en carbono como heno, hojas secas o aserrín. Un adecuado equilibrio C/N es crucial para estimular la acción microbiana y favorecer el incremento de la temperatura del sistema y optimizar la degradación de la materia orgánica (Aliahmad et al., 2023):

- Es un activador microbiano, estimula la proliferación de bacterias descomponedoras en la fase inicial del compostaje
- Reduce el tiempo, es decir mejora la velocidad de descomposición y favorece una fase termofílica más rápida y prolongada
- Ayuda a la producción ecológica, con el sistema de agricultura sostenible que buscan insumos de bajo impacto ambiental.

2.5.9. Cal dolomita

La cal dolomita es una enmienda agrícola compuesta principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3) y carbonato de magnesio (MgCO_3), derivada de la roca dolomita finamente molida. A diferencia de la cal agrícola común, la dolomita aporta magnesio adicional al suelo, lo que la hace útil tanto para la corrección de acidez como para la optimización de la capacidad fértil del suelo. Se utiliza especialmente para neutralizar suelos ácidos, optimizar el acceso a nutrientes esenciales y estimular condiciones de pH óptimo para la actividad microbiana, lo cual resulta fundamental en procesos como el compostaje y en sistemas agrícolas sostenibles (Zhao et al., 2022).

La cal dolomita desempeña un papel fundamental en el compostaje, principalmente por su capacidad de regular pH del sustrato. Durante el proceso de descomposición, la actividad microbiana puede generar ácidos orgánicos eficiente de la materia orgánica. La cal dolomita neutraliza esta acidez, manteniendo un pH óptimo (cercano a neutro) para la actividad de bacterias y hongos beneficiosos.

Además, su contenido de carbonato de magnesio (MgCO_3) proporciona magnesio, un micronutriente esencial que mejora la calidad del compost final y enriquece el contenido mineral del producto. Su uso también ayuda a reducir olores desagradables y a minimizar la volatilización

del nitrógeno, conservando nutrientes importantes en la mezcla orgánica. Por tanto, la cal dolomita no solo actúa como corrector de acidez, sino también como mejorador de la estabilidad química y microbiológica del compost, promoviendo un desarrollo más eficiente y un resultado final con mejores cualidades (Zhao et al., 2022).

2.5.10. Cal agrícola

La cal agrícola es una enmienda mineral compuesta principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3), utilizada para remediar la acidez del sustrato y optimizar sus condiciones fisicoquímicas. Se obtiene a partir de la molienda de rocas calizas y puede presentarse en forma de polvo fino o granulada. Su uso radica en contrarrestar la acidez aumentando el pH del suelo o de los residuos orgánicos, lo que activa el desarrollo microbiano y la absorción de compuestos esenciales para plantas.

En el compostaje la cal agrícola se aplica para ajustar el pH del material orgánico, reduciendo la formación de ácidos volátiles y mejorando las condiciones para una descomposición más eficiente y estable. A diferencia de la cal dolomita, la cal agrícola aporta calcio, pero no magnesio, siendo adecuada cuando no se requiere corrección de deficiencias de ese nutriente (AGRONET, 2023).

La cal agrícola desempeña un papel en el compostaje, ya que actúa como regulador del pH y favorece un entorno óptimo para la actividad microbiana. Durante el proceso de descomposición la acumulación de ácidos orgánicos puede acidificar la mezcla, ralentizando la actividad de microorganismos descomponedores como bacterias y actino bacterias. La incorporación de cal agrícola permite neutralizar esta acidez, manteniendo el pH y un rango cercano a la neutralidad (6.5-7.5), ideal para la eficiencia del compostaje.

Además, al aportar calcio, mejora la estructura física del material compostado, reduce olores desagradables y ayuda a minimizar la pérdida de nitrógeno por volatilización, principalmente en forma de amoníaco. Su uso también contribuye a acelerar la fase termofílica, facilitando la higienización del compost y la descomposición de compuestos orgánicos más complejos. Por tanto, la cal agrícola no solo corrige la acidez, sino que potencia la calidad microbiana y química del compost, haciendo que el producto final sea más estable, maduro y apto para la aplicación agrícola (AGRONET, 2023).

2.6. Tipos de compostaje

2.6.1. Pilas de compostaje con ventilación pasiva

Las pilas de compostaje con ventilación pasiva de 3m x 3m son estructuras diseñadas para facilitar el proceso de descomposición aeróbica de residuos sin necesidad de sistemas mecánicos de aireación. Estas pilas están construidas sobre una base que permite el ingreso natural de aire, ya sea por medio de una capa inferior de material leñoso o a través de tubos perforados colocados de forma estratégica. La ventilación pasiva se basa en el principio de convección natural de aire, donde el calor generado por la actividad microbiana impulsa el movimiento del aire desde la base hacia la parte superior, permitiendo el ingreso de oxígeno y la liberación de gases como el CO₂ y el vapor de agua.

Este método es ampliamente utilizado en zonas rurales y sistemas de compostaje a pequeña o media escala, ya que reduce costos operativos al prescindir de equipos eléctricos y promueve una descomposición eficiente si se mantiene un adecuado equilibrio de humedad, carbono/nitrógeno (C/N) (Idrovo, 2020).

2.6.2. Compostaje en Cama

El compostaje en cama es una técnica de descomposición controlada de residuos orgánicos que se lleva a cabo directamente sobre el suelo, sin necesidad de estructuras cerradas. Consiste en formar una cama ancha y alargada de materiales orgánicos, como estiércoles, restos de cosecha, residuos florícolas o vegetales, distribuidos uniformemente para crear un lecho con dimensiones variables, comúnmente de 1 a 1.5 metros de altura y varios metros de ancho.

Este método es ampliamente utilizado en sistemas agrícolas y ganaderos por ser más económico, fácil de aplicar y capacidad para procesar grandes volúmenes de residuos. La aireación se da de forma natural, aunque es necesario realizar volteos periódicos cada 10 o 15 días para mantener condiciones aeróbicas y evitar malos olores o fermentaciones indeseadas. También se requiere de monitoreo de variables como la razón carbono/nitrógeno (C/N), la humedad óptima de 40 a 60% y la temperatura, para asegurar el desarrollo de compostaje eficaz y la obtención de un producto final maduro y de buena calidad (Callejo, 2021).

2.7. Marco legal

La presente investigación sobre la aplicación de microorganismos en la descomposición de residuos florícolas se enmarca dentro de una serie de normativas ambientales, sanitarias y de bioseguridad vigentes en el territorio nacional. Este marco legal tiene como propósito sustentar jurídicamente el uso de métodos biotecnológicos para el tratamiento sostenible de residuos orgánicos, en concordancia con los principios de protección ambiental y desarrollo sostenible.

La **Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)** promueve el aprovechamiento sustentable y la prevención de la contaminación, estableciendo que la prevención de las causas que generan desequilibrios ecológicos es el medio más eficaz para evitarlos (Congreso de la Unión, 2024).

Por su parte, la **Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)** fomenta el uso de tecnologías limpias como el compostaje y la biodegradación de residuos orgánicos, clasificando los residuos florícolas dentro de esta categoría (Congreso de la Unión, 2003).

La **NOM-083-SEMARNAT-2003** respalda la disposición responsable de residuos y alienta procesos como el tratamiento biológico para reducir su impacto ambiental (DOF, 2003).

A nivel internacional, el **Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB)** y el **Protocolo de Cartagena** regulan el uso responsable de microorganismos, garantizando su uso seguro y respetuoso con el medio ambiente (Naciones Unidas, 1993; 2003).

En conjunto, estas normativas proporcionan el respaldo legal necesario para aplicar microorganismos en la descomposición de residuos florícolas, promoviendo prácticas sostenibles y respetuosas con la biodiversidad.

- **Plan Nacional de Desarrollo del Ecuador y su vinculación con la investigación**

En el contexto ecuatoriano, esta investigación se fundamenta en las directrices del Plan Nacional de Desarrollo del Ecuador, actualmente denominado Plan Nacional de Desarrollo 2022–2025: “Gobierno del Encuentro”, documento rector que establece políticas orientadas al fortalecimiento de la sostenibilidad ambiental, innovación tecnológica y manejo adecuado de los residuos. Este plan promueve la transición hacia una economía circular, incentivando la

valorización de desechos orgánicos mediante procesos biotecnológicos, tales como el compostaje con microorganismos beneficiosos.

Dentro de sus lineamientos, el PND enfatiza la importancia de impulsar tecnologías limpias, reducir la contaminación, proteger los ecosistemas y optimizar el uso de recursos naturales. La presente investigación sobre compostaje de residuos florícolas se vincula directamente con los objetivos nacionales de sostenibilidad, al proponer un manejo responsable de los desechos, la reducción del impacto ambiental y la generación de insumos orgánicos que favorecen la salud del suelo.

Vinculación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

La investigación también se articula con la Agenda 2030 y diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible:

ODS 12: Producción y Consumo Responsables

- El compostaje con microorganismos reduce la cantidad de residuos florícolas enviados a botaderos.
- Contribuye a la meta 12.5, que busca disminuir la generación de desechos mediante reciclaje y reutilización.

ODS 13: Acción por el Clima

- La gestión biotecnológica de residuos disminuye emisiones asociadas a descomposición anaeróbica o quema.
- Aporta a estrategias nacionales de mitigación del cambio climático.

ODS 15: Vida de Ecosistemas Terrestres

- El abono producido mejora la fertilidad del suelo y reduce el uso de fertilizantes químicos.
- Favorece la biodiversidad del suelo y la recuperación de ecosistemas degradados.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción del área de estudio

El estudio fue realizado en la empresa florícola Mystic Flowers ubicada en Cangahua parroquia del cantón Cayambe (Figura 2), donde se desarrolló el estudio enfocado en la aplicación de microorganismos para la descomposición de residuos florícolas. Esta empresa representó un área clave para el proyecto, ya que fue la fuente principal de la materia vegetal necesaria para el análisis. Las características edafoclimáticas del sitio donde se realizó el estudio se muestran en la Tabla 1.

Figura 2.
Descripción de área de estudio

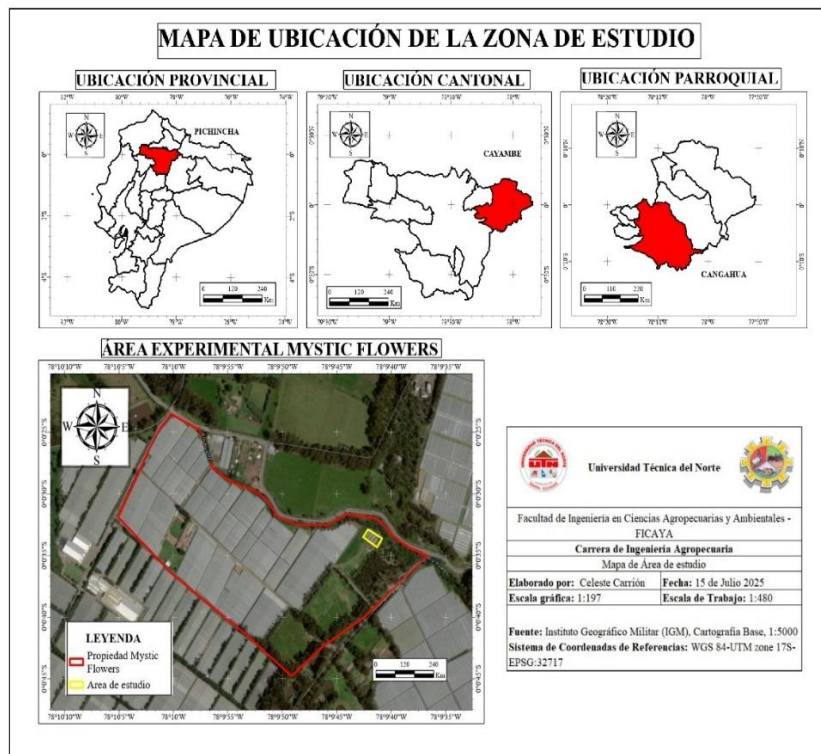


Tabla 1
Descripción de las condiciones agroclimáticas del área de estudio donde se evaluaron los microorganismos

Caracterización agroclimática	
Localidad	
Provincia	Pichincha
Cantón	Cayambe
Parroquia	Cangahua
Situación geográfica	
Altitud	2 000 – 3 500 m s.n.m
Longitud	78.169°O (78° 10' 9'' Oeste)
Latitud	0.061° S (0° 3' 40'' Sur)
Temperatura promedio (°C)	11.7 °C

Fuente: Vallejo (2021)

3.2. Materiales, insumos y herramientas

A continuación (Tabla 2), se describen los materiales, insumos y herramientas, que se emplearon en la fase experimental de campo para el logro de los objetivos propuestos.

3.3. Métodos

Esta investigación tuvo como finalidad analizar la efectividad de tres métodos distintos de compostaje utilizando un enfoque experimental comparativo para analizar su desempeño y resultados.

Tabla 2.*Recursos materiales, tecnológicos y logísticos empleados en la fase experimental de campo*

Materiales	Equipos	Insumos	Herramientas
Cinta métrica	Picadora de	Desechos florícolas (plantas de rosas	Palas
Estacas de madera	residuos vegetales	picadas)	Guantes
Estructura de malla	Termómetro	Orbiifix	Carretilla
Tubos PVC	TDR (medidor de	Urea verde	Azadones
	humedad)	Sulfato de zinc heptahidratado	Regadera
	Penetrómetro	Sulfato de cobre pentahidratado	
	Cámara	Sulfato de manganeso	
	fotográfica	monohidratado	
	Computadora	Radiifix	
	Infostat	Cal dolomita	
		Cal agrícola	
		Ferreux Compost	

3.3.2 *Tratamientos*

En la Tabla 3 se describen los tratamientos considerados en el presente estudio.

Tabla 3.*Tratamientos considerados en el estudio y cantidades de insumos utilizados*

Tratamiento	Método	Insumos utilizados
T1	Pilas de compostaje con ventilación pasiva	-Orbiifix 10 L -Urea verde 220 kg -Sulfato de zinc heptahidratado 4560 g. -Sulfato de cobre pentahidratado 400 g -Sulfato de manganeso monohidratado 2920 g -Radiifix 270 L -Cal dolomita 621 kg -Cal agrícola 648 kg -Ferreux compost 5 L -Agua 5000 L
T2	Método finca	-Orbiifix 10 L -Ferreux Compost 5 L -Agua 2500 L
T3	Testigo (sin insumos microbianos)	-Agua 2500 L

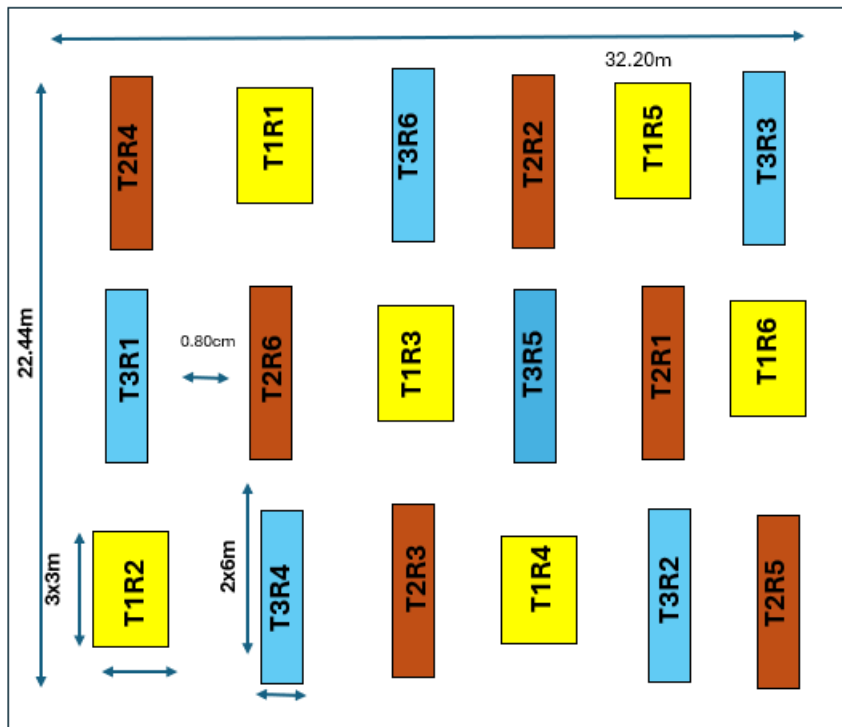
Nota: Las cantidades de cada uno de los productos fueron seleccionados en función de un análisis previo, considerando tanto las necesidades específicas del proceso de compostaje como el nivel de generación y tipo de residuos presentes en la empresa.

3.3.3. Diseño experimental

Se aplicó un diseño completamente al azar (DCA) con seis repeticiones por tratamiento conforme a esquema presentado en la Figura 3.

Figura 3.

Organización del diseño experimental del estudio



Nota: T1: pilas de compostaje con ventilación pasiva; T2: método finca; T3: Testigo; R: repetición por tratamiento

3.3.4 Condiciones del experimento

Para garantizar la correcta ejecución del ensayo y describir con precisión el contexto experimental, a continuación, se presentan las condiciones generales bajo las cuales se desarrolló el estudio:

- Tratamientos: 3

- Repeticiones: 6
- Número de unidades experimentales: 18
- Área total del ensayo: 722.37 m²

En la Tabla 4 se detallan las especificaciones técnicas de las unidades experimentales diseñadas para la evaluación de la aplicación de microorganismos en pilas de compostaje, implementadas por la empresa Mystic Flowers.

Tabla 4

Descripción y distribución de las unidades experimentales por tratamiento y bloque

Datos	Medidas
Área de la unidad experimental T1	3x3 m ²
Área de la unidad experimental T2-T3	2x6 m ²
Distancia entre unidades experimentales	1.5 m

Nota: Las áreas identificadas como T1, T2 y T3 representan las dimensiones de cada unidad experimental, correspondientes a los tratamientos evaluados en el ensayo.

3.3.5. Análisis estadístico

Se utilizó el software estadístico InfoStat, versión 2020 para procesar los datos recopilados. Se llevó a cabo la comparación de medias utilizando la prueba LSD de Fisher, considerando un nivel de significancia del 5 %, todo conforme a lo presentado en la Tabla 5.

Tabla 5

Análisis de varianza ADEVA del efecto de aplicación de microorganismos en residuos florícolas

Fuente de variación	Grados de libertad
Tratamiento	3-1=2
Error	(3) (6-1) = 15
Total	(3)(6)-1= 17

3.3.6 Variables a evaluarse

Los siguientes parámetros fueron referenciados según lo establecido en el manual de Compostaje del agricultor (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2013). Estos se tomaron por cada una de las réplicas.

3.3.6.1. Temperatura. Esta variable fue evaluada utilizando un termómetro de 2 metros de longitud, registrando las mediciones en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) (Figura 4). Las lecturas se realizaron siguiendo un patrón en zigzag, tomando datos en cada uno de los lados de las pilas de compostaje, donde la toma de datos se realizó en la parte inferior lado derecho y superior lado izquierdo, en cada uno de los lados se tomaron 15 puntos para observar la temperatura en su totalidad. Las mediciones comenzaron dos días después del armado de las pilas y se continuaron realizando hasta alcanzar la etapa final del proceso de compostaje que fue un mes.

Figura 4.

Evaluación de la variable de temperatura

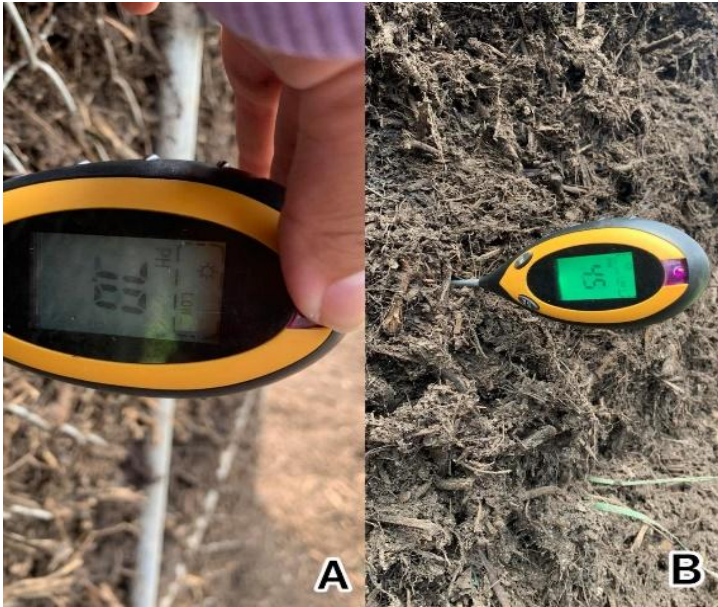


Nota: A: Toma de temperatura; B: Grados de temperatura obtenidos

3.3.6.2. El pH. Refleja el grado de acidez o alcalinidad del compost. Para su determinación, se empleó un pH-metro, realizando mediciones entre dos y tres veces por semana. Las muestras se tomaron siguiendo un patrón en zigzag, abarcando todos los lados de las pilas de compostaje, con el fin de obtener una lectura representativa del material (Figura 5).

Figura 5

Evaluación de la variable de pH



Nota: A: pH tomado en el método de pilas B: pH tomado en el método convencional

3.3.6.3. Color. El color del compost es un indicador de su madurez. Esta variable se la tomo de forma visual dos veces por semana con dos muestras diferentes una de forma interna y otra de forma externa. La clasificación del color se basó en criterios descritos por la US Composting Council (USCC, 2017), que permiten identificar el nivel de descomposición y estabilización del material en función de tonalidades características del compost en distintas fases (Tabla 6).

Tabla 6

Evaluación de la tabla de color

Color	Descripción
Marrón claro	Material poco descompuesto; presencia de restos fácilmente reconocibles; baja humedad.
Marrón medio	Compost en proceso activo; la materia orgánica empieza a homogenizarse; humedad moderada.
Marrón oscuro	Compost estabilizado; buena descomposición; estructura más fina y homogénea.
Negro homogéneo	Compost maduro; humedad óptima y alto grado de humificación.
Negro con manchas grises o blanquecinas	Presencia de termófilos como <i>Actinomycetes</i> ; indica fase de calentamiento, no madurez final.
Negro brillante	Posible exceso de humedad o compactación; riesgo de condiciones anaeróbicas.

Fuente: US Composting Council. (2017)

Figura 6

Análisis de la variable color



Nota: A: Color de pilas de compostaje; B: Color de método convencional y testigo.

3.3.6.4. Olor. Esta variable se tomó sin ninguna herramienta, se registró el olor pasando dos días para la recolección de los datos, se fundamentó en la escala indicada en la Tabla 7.

Tabla 7

Evaluación de la tabla de olor

Olor	Descripción
Alto	El olor es muy fuerte
Medio	El olor es tolerable
Bajo	El olor es bajo

3.3.6.5. Porosidad. La porosidad es una propiedad del compostaje relacionada con los espacios vacíos presentes en su estructura. Para determinar esta variable, se tomó una muestra del compostaje terminado.

La muestra tenía un peso de 200 g a esta se le añadieron 200 ml de agua y se observó la retención de agua para estimar su porosidad. Se utilizó un método casero en el que se midió el volumen de agua absorbido por el compost, comparando el volumen inicial de la muestra con la cantidad de agua que retuvo. Este dato fue tomado una sola vez al obtener el compost final. Los resultados fueron interpretados utilizando la escala indicada en la Tabla 8.

$$\text{Humedad retenida (\%)} = \frac{(V_i - V_f)}{V_i} * 100$$

donde:

V_i = volumen inicial de agua añadido (mL)

V_f = volumen de agua no absorbido, medido tras el drenaje (mL)

La cantidad de agua absorbida por el compost permitió estimar su porosidad funcional. Esta medición se realizó una sola vez al finalizar el proceso de compostaje, y los resultados se interpretaron con base en la escala presentada en la Tabla 8.

Tabla 8

Evaluación de la tabla de porosidad

Porosidad	Descripción
Ligero	Tiene un porcentaje de agua retenida de 30-45 %
Medio	Tiene un porcentaje de agua retenida de 45-55 %
Pesado	Tiene un porcentaje de agua retenida de 55-60 %
Turboso	Tiene un porcentaje de agua retenida de 75-90 %

En la Figura 7 se detalla el procedimiento para el análisis de la porosidad. En B) se toma la muestra del medio y en (A) se observa el porcentaje de porosidad indicado por el instrumento.

Figura 7

Análisis de la variable de porosidad



Nota: A: Porcentaje de porosidad; B: Muestra tomada

3.3.6.6. Humedad. La humedad del compostaje se evaluó utilizando un medidor de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), con mediciones expresadas en porcentaje (%). Las mediciones se realizaron siguiendo un patrón en zigzag, cubriendo ambos lados de la pila de

compostaje. Estos datos fueron tomados al momento de armar la pila y se registraron tres veces por semana durante el proceso de compostaje.

Figura 8

Análisis de la variable humedad



Nota: A: Ejemplo de valor obtenido en la humedad; B: Instrumento ocupado para la variable de humedad

3.4. Manejo del experimento

3.4.1. Medición y delimitación de la superficie experimental

Se realizó una medición completa del terreno, el cual fue subdividido en tres áreas específicas para la disposición de las pilas de compost. En cada una de estas áreas se colocaron estacas que marcaron los puntos exactos donde se ubicarían las pilas. Además, se identificó y se marcó el lugar destinado a la reconstrucción de las pilas después del volteo, asegurando su seguimiento durante todo el proceso.

Figura 9

Área donde se desarrolla la investigación



3.4.2. Recolecta y triturado de los residuos florícolas

Se procedió a recolectar los residuos generados en cada uno de la investigación, los cuales fueron transportados a la compostera. En el lugar, se utilizó una picadora para triturar los desechos, con el objetivo de reducir su tamaño a la menor dimensión posible, favoreciendo así un proceso de compostaje más eficiente.

Figura 10

Recolección de residuos



3.4.3. Pretratamiento de la materia prima

Una vez triturados y dispersados los desechos, se aplicó ORBIIFIX como inoculante para agilizar el proceso de descomposición de la materia orgánica. Se utilizaron 10 litros de producto por tratamiento, es decir, un total de 20 litros, los cuales fueron distribuidos uniformemente mediante un riego tipo drench, utilizando una llovedera. Este procedimiento se aplicó al tratamiento 1 y 2 para asegurar una correcta inoculación y optimizar el proceso de descomposición.

Figura 11

Pretratamiento



3.4.4. Preparación de producto para alcanzar la humedad adecuada

Para alcanzar la humedad ideal del 60 % en términos de humedad volumétrica, se llenó un tanque con capacidad de 2000 litros de agua. A continuación, se disolvieron los siguientes productos químicos en el agua: 11 kilos de urea verde, 228 gramos de sulfato de zinc heptahidratado, 20 gramos de sulfato de cobre pentahidratado y 146 gramos de sulfato de manganeso monohidratado. Esta solución fue utilizada exclusivamente para el Tratamiento 1, con el fin de asegurar la humedad adecuada para el proceso de compostaje.

Figura 12

Pesaje de producto



3.4.5. Construcción de pila y camas para desarrollo de compostaje

Una vez preparado el producto, se procedió a la construcción de la pila de compostaje. La pila fue formada alternando capas de materia verde y materia descompuesta. Se comenzó con una capa de materia descompuesta que tenía un volumen de $1,8 m^3$. Sobre esta capa se añadió una capa de materia verde con un volumen de $5,4 m^3$, esta capa fue a la única que se le incorporó la mezcla previamente elaborada. Este proceso de alternancia de capas se repitió hasta formar un total de nueve capas en la pila.

Para el Tratamiento 2, se utilizó exclusivamente materia verde inoculada, la cual fue amontonada y combinada con 1000 litros de agua formando así una cama con medida de $2 \times 6 m^2$, sin añadir ninguna mezcla de producto utilizado en el Tratamiento 1.

Para el Tratamiento 3 solo se añadieron 1000 litros de agua y se formó una cama con la medida de $2 \times 6 m^2$.

Figura 13

Armado de pilas



3.4.6 Control de los factores de la pila del compostaje

Se realizó un monitoreo de los tratamientos durante un periodo de dos semanas, durante el cual no se les añadió ningún material ni tratamiento adicional.

3.4.7. Volteos continuos de las pilas de compostaje

Al cumplirse las dos semanas, se procedió a desarmar la pila. Antes de la aplicación de cualquier producto, se dispersaron manualmente 621kg de cal dolomita y 648 kg de cal agrícola de manera homogénea sobre la pila mientras esta se iba desarmando para que el producto se disperse. Posteriormente, se inoculó mediante riego tipo drench en el tratamiento T1, se añadieron 270 litros de RADIIFIX disueltos en 1000 litros de agua, junto con 5 litros de FERREUX COMPOST diluidos en 10 litros de agua, después de esto se mezcló y se reconstruyó la pila buscando compactar lo más posible, para que esta no se destruya.

En el Tratamiento 2, se aplicaron únicamente 5 litros de FERREUX COMPOST con 10 litros de agua, aplicado con tipo de riego drench seguidos de un riego de 1000 litros de agua para asegurar una humedad homogénea, continuando con el volteo completo de la cama. Posteriormente, esta fue reestructurada y devuelta a su estado inicial.

En el Tratamiento 3, se aplicaron únicamente 1000 litros de agua mediante riego, seguido del volteo completo de la cama. Posteriormente, esta fue reestructurada y devuelta a su estado inicial.

Figura 14

Volteo



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el estudio para evaluar la eficacia de microorganismos en el compostaje de residuos florícolas durante las distintas fases del proceso, permiten determinar la calidad del compost final. Se analizaron variables como la temperatura, el pH, la humedad, color, olor y porosidad. Estos indicadores reflejan la actividad microbiana y la estabilidad del sustrato, y son fundamentales para comprender la dinámica de descomposición y la transformación de los residuos florícolas en un producto estable y rico en nutrientes.

4.1. Temperatura

En la Tabla 9, el análisis de varianza evidenció un efecto altamente significativo de los tratamientos sobre la variable temperatura ($p < 0.0001$), lo cual respalda la eficacia diferencial de los compostajes inoculados con microorganismos frente al testigo en el comportamiento térmico del sistema. Asimismo, el factor días de evaluación mostró un efecto altamente significativo ($p < 0.0001$), lo cual está vinculado con la naturaleza biológica del compostaje. Esto evidencia que el sistema atravesó las etapas sucesivas de calentamiento y enfriamiento, validando que los datos capturaron la dinámica en el tiempo del proceso microbiano.

La presencia de interacción significativa entre tratamiento y días de evaluación ($p < 0.0001$) sugiere que el efecto de estos sobre la temperatura varió a lo largo del tiempo. Estadísticamente significa que no todos los tratamientos se comportaron igual en cada fase; los inóculos probablemente aceleraron el alcance de temperaturas máximas en días, lo que explica la alta variabilidad en la interacción.

En cuanto a los efectos espaciales, el factor lado mostró una significancia ($p = 0.0410$) la cual establece que la posición dentro de la pila (derecha, izquierda, superior, inferior) influyó en la retención de la temperatura. Sin embargo, la falta de significancia en las interacciones días de evaluación - lado ($p > 0.9999$) y tratamiento - lado ($p = 0.3756$) sugiere que, aunque hay gradientes térmicos por ubicación, estos no alteraron la trayectoria general de los tratamientos ni la progresión del compostaje en el tiempo.

Las diferencias significativas entre tratamiento y variables espaciales refuerzan la necesidad de un abordaje analítico estratificado para dilucidar los efectos específicos de cada combinación experimental, así como su evolución al transcurrir los días en el periodo de estudio.

Tabla 9

Análisis de la varianza (SC tipo III) de la temperatura del compost

Fuente	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	349391.95	299	1168.53	23.94	<0.0001
días de evaluación	27155.34	24	1131.47	23.18	<0.0001
Tratamiento	124538.83	2	62269.42	1275.70	<0.0001
Lado	110.13	3	36.71	10.75	0.0410
dde*tratamiento	36162.57	48	753.39	15.43	<0.0001
dde *lado	445.25	72	6.18	0.13	>0.9999
tratamiento*lado	314.48	6	52.41	1.07	0.3756
dde*tratamiento*lado	1547.32	144	10.75	0.22	>0.9999
Error	356278.36	7299	48.81		
Total	705670.31	7598			

En la Figura 15 del dominio temporal muestra una variación térmica distintiva entre los diferentes tratamientos durante toda la evaluación. La temperatura en los tratamientos T2 y T3 se mantuvo por encima de los 60 °C, mientras que sus picos alcanzaron temperaturas superiores a los 70 °C, lo que indica una fase termófila intensa y prolongada. Estas condiciones crean un ambiente ideal para la sanitización del compost y la rápida descomposición de materiales orgánicos complejos (Jurado, 2021).

El perfil térmico del tratamiento T1 mostró patrones inestables, ya que comenzó con un aumento constante de temperatura que luego descendió abruptamente hasta alcanzar los 45 °C durante las etapas intermedia y final del tratamiento. La investigación de Tola et al. (2024) establece que la actividad de los microorganismos termófilos se ve restringida cuando las temperaturas descienden a 55-60 °C, lo que provoca un retraso en el compostaje, según las observaciones de T1.

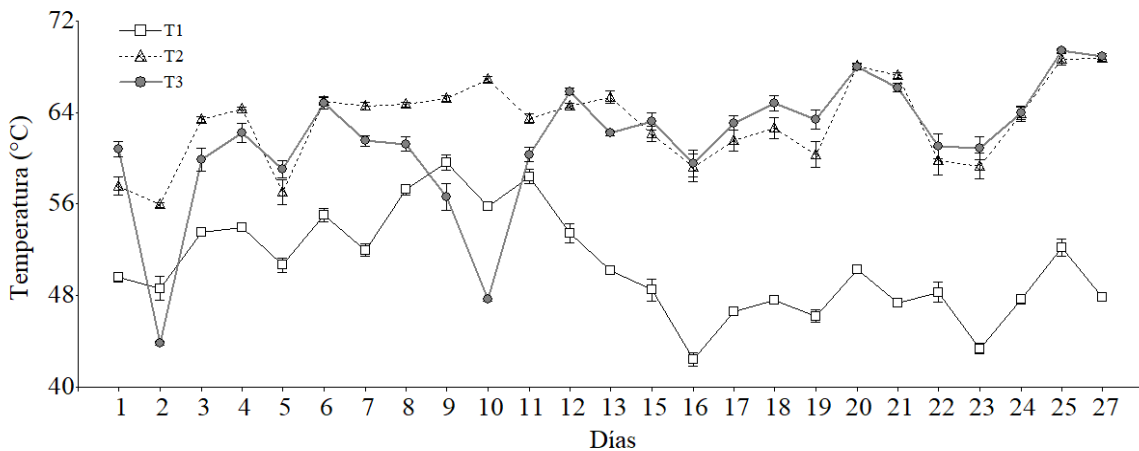
El período prolongado de altas temperaturas en T2 y T3 indica un mejor rendimiento del proceso, gracias tanto a los ingredientes del tratamiento como a la correcta implementación de sistemas de aireación y métodos de construcción de pilas. La investigación de Cancio (2024)

demuestra que las técnicas correctas de compostaje producen estabilidad térmica, lo que confirma la secuencia correcta de crecimiento microbiano.

Hacia el final del periodo de estudio, las curvas de los tres tratamientos tienden a converger, iniciando la fase de enfriamiento. Aun así, el área bajo la curva de T2 y T3 es visiblemente mayor, lo que sugiere una gran acumulación de calor, factor determinante para la degradación de compuestos residuales y la reducción de la humedad en el compost.

Figura 15

Evolución de la temperatura del compost en función de los días para los tratamientos T1, T2 y T3



La Figura 16 ilustra la variabilidad térmica en función de la ubicación espacial dentro de las pilas de compostaje. Se observa que los lados 1 y 2 registraron temperaturas superiores en comparación con los lados 3 y 4, lo cual coincide con la significancia estadística reportada para el factor lado ($p=0.0410$). Las diferencias térmicas responden a las características microambientales intrínsecas del sistema de pilas. Los lados de mayor temperatura suelen asociarse a una porosidad óptima que facilita la circulación de oxígeno, esencial para el metabolismo aeróbico. Por el contrario, las variaciones en los lados 3 y 4 podrían atribuirse a efectos de borde, donde la mayor exposición a la temperatura ambiental y posibles fluctuaciones en la humedad local limitan la retención del calor generado por los microorganismos (Martínez y Martínez, 2022).

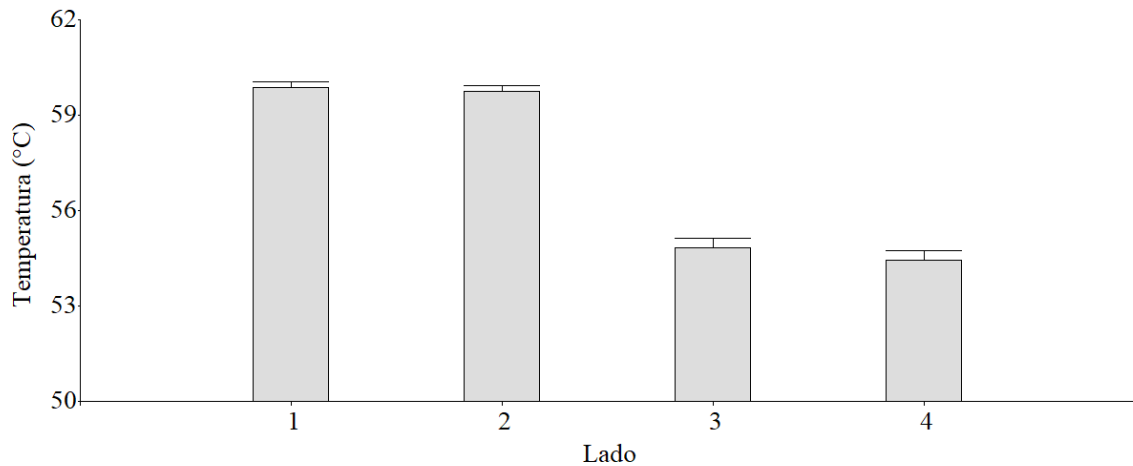
Los resultados demuestran que el comportamiento térmico del compost depende de la interacción entre el tiempo de proceso y la estrategia de inoculación. Los tratamientos T2 y T3 exhibieron un rendimiento superior al mantener rangos termofílicos sostenidos. Esta estabilidad

térmica es crucial, ya que asegura la higienización del material mediante la inactivación de patógenos y acelera la descomposición de los polímeros, acortando el ciclo de maduración del compostaje.

Las observaciones del T3 muestran que la comunidad bacteriana natural presente en el material determina el éxito de la fermentación, según Cancio (2024), quien estableció que los métodos correctos de manipulación y aireación del material tienen el mismo valor que la adición de microorganismos externos. El tratamiento T1 mostró limitaciones térmicas, manteniéndose por debajo de los niveles óptimos en varios puntos del muestreo. Esto podría estar vinculado a problemas de volteo y gestión de la humedad que afectan el rendimiento microbiano del proceso. Estos resultados guardan relación con lo expuesto por Jurado (2021) y Tola et al. (2024), quienes establecieron que el compostaje requiere temperaturas superiores a 60 °C para lograr resultados eficientes y de alta calidad.

Figura 16

Temperatura promedio del compost según el lado de medición



4.2. pH

El factor días de evaluación presentó alta significancia estadística ($p < 0.0001$). Esto indica que el tiempo es el factor que más influye en el cambio del pH. Es un resultado biológicamente esperado, ya que el pH en el compostaje fluctúa drásticamente, generalmente cae al inicio debido a la producción de ácidos orgánicos, luego aumenta a medida que estos ácidos se consumen y se

produce amoníaco para finalmente estabilizarse. El factor tratamiento también resultó altamente significativo ($p < 0.0001$). Esto demuestra que la presencia de los microorganismos inoculados y los naturalmente presentes, alteraron de forma real el equilibrio químico del sistema. La interacción días de evaluación-tratamiento es significativa ($p < 0.0001$), lo que significa que el pH de cada tratamiento evolucionó de forma diferente a lo largo de los días. Se confirma que el efecto de los inóculos depende del momento (fase) en que se encuentre el compostaje. Estos resultados se observan en la Tabla 10.

Tabla 10

Análisis de varianza de la variable de pH

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	1040	5054.59	<0.0001
Ddi	23	1040	163.53	<0.0001
Tratamiento	2	1040	10.62	<0.0001
ddi:Tratamiento	46	1040	1.8	<0.0001

La Figura 17 muestra cómo cambiaron los niveles de pH durante el proceso de compostaje de 25 días para los tratamientos T1, T2 y T3, con una interacción altamente significativa con los días de evaluación ($p < 0.0001$). El comportamiento observado demuestra que los valores de pH en los sistemas de compostaje cambian rápidamente con el tiempo, que siguieron un patrón particular que comenzó con condiciones ácidas antes de alcanzar estados casi neutros y ligeramente alcalinos.

Al inicio del proceso, se observa que los tratamientos T2 y T3 mantienen niveles de pH ligeramente superiores y más estables que T1, el cual presenta los valores más ácidos el día 1. Los tres tratamientos mantuvieron niveles de pH entre 4,6 y 4,9 durante sus primeros cinco días de funcionamiento. La fase mesófila inicial produjo un ambiente ácido por la rápida descomposición microbiana de compuestos simples (Martínez y Martínez, (2022).

Durante el periodo de transición (día 7 al 11), T1 muestra un ascenso más lento, el tratamiento T3 presenta un incremento acelerado el día 9, alcanzando valores cercanos a 6.4. Se confirma visualmente, que la velocidad de degradación de nitrógeno orgánico y la consecuente liberación de amoníaco ocurrió a diferentes ritmos para cada tratamiento. Según Jaimes-Díaz et al.

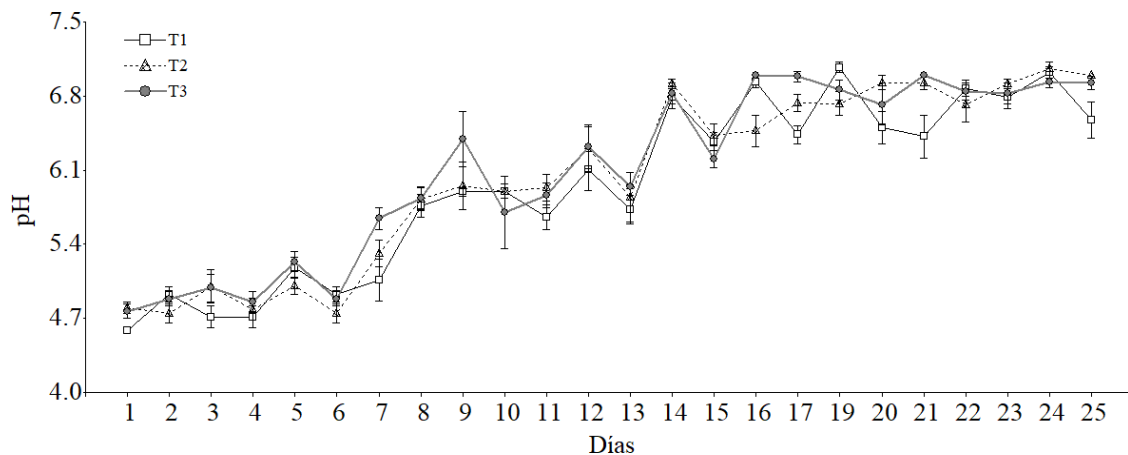
(2021) la liberación de NH_3 durante esta etapa produce un efecto alcalinizante que conduce a una elevación del pH.

Los valores de pH experimentaron cambios mínimos entre los días 12 y 14, mientras que continuaron aumentando hasta alcanzar entre 6,6 y 6,8. Estas fluctuaciones se pueden atribuir a la coexistencia de procesos de mineralización y nitrificación, así como a variaciones locales en la aireación y la actividad microbiana dentro de las pilas de compost. Cancio (2024) explica que los sistemas de compostaje experimentan estas variaciones intermedias, lo que indica una reorganización de la comunidad microbiana en lugar de inestabilidad del proceso.

Terminando el ciclo, aunque todos los tratamientos convergen hacia la neutralidad ($\text{pH} = 7.0$), la gráfica muestra que el T1 experimenta caídas bruscas de pH (días 21 y 25), a diferencia de la mayor estabilidad observada en T2 y T3. Esta variabilidad final explica la significancia de la interacción entre días de evaluación y tratamiento. El compost ha alcanzado su etapa de maduración porque su proceso de estabilización muestra que la actividad microbiana está disminuyendo a medida que se consumen los compuestos fácilmente degradables. En este sentido, Zhao et al. (2022), demostraron que el compost alcanza su madurez completa cuando su nivel de pH se acercó a la neutralidad, lo que indica estabilidad química para fines agrícolas.

Figura 17

Variación en el pH entre los tres tratamientos por días



4.3. Color

4.3.1. Color externo

Hay una relación estadísticamente significativa entre los diferentes tratamientos ($gl= 60$, $p < 0.0001$) y el color externo que presenta el compost. Esto significa que la aplicación de distintos tratamientos conduce a diferencias en el color visual del producto. La asociación entre estas variables es fuerte a muy fuerte como indican los coeficientes de contingencia de Cramer (0.64) y Pearson (0.82) en la Tabla 11. Esto implica que los tratamientos son un factor determinante importante para el color del compost.

Tabla 11

Evaluación estadística de la variable color externo en los tratamientos de compostaje

Estadístico	Valor	Gl	P
Chi Cuadrado Pearson	311.07	68	<0.0001
Chi cuadrado MV-G2	332.86	68	<0.0001
Coef. Conting. Cramer	0.64		
Coef. Conting. Pearson	0.82		

Nota: para esta variable se evaluaron los siguientes colores visuales: presencia de capas diferenciadas, café claro, café oscuro y café concentrado.

4.3.2. Color interno

Existe una relación estadísticamente significativa entre los tratamientos y el color interno del compostaje ($gl=102$; $p<0.0001$). La fuerza de esta asociación es moderadamente fuerte a muy fuerte según los coeficientes de contingencia (Cramer 0.54 y Pearson 0.82). Esto implica que los tratamientos de compostaje son un factor influyente en el color interno del producto. Los datos se registran en la Tabla 12.

Tabla 12*Evaluación estadística de la variable color interno en los tratamientos*

Estadístico	Valor	Gl	P
Chi Cuadrado Pearson	313.47	102	<0.0001
Chi cuadrado MV-G2	310.46	102	<0.0001
Coef. Conting. Cramer	0.54		
Coef. Conting. Pearson	0.82		

Según Gutiérrez-González et al. (2024), el color representa una de las características físicas más significativas del compost maduro, manifestándose en tonalidades marrón oscuro o casi negro como resultado de la humificación de la materia orgánica. Este parámetro evidencia el grado de biodegradación alcanzado y puede utilizarse como criterio visual de calidad. Tal como se observa en el presente estudio, la variabilidad del color interno entre tratamientos sugiere diferencias en la actividad microbiana, grado de descomposición y posibles zonas anaeróbicas influenciadas por el tratamiento aplicado, resultando en colores más oscuros y homogéneo internamente.

Según Cancio (2024), los resultados obtenidos en la investigación son similares en la variable de color interno y externo del compost, el cual presento tonalidades uniformes que iban desde marrón oscuro hasta negro, con una textura suave, compuesta por partículas sólidas pero sueltas. Estas características concuerdan con las descritas en este estudio, en los que el compost ha sido comparado visualmente con tonalidades como café claro, café concentrado, café oscuro, negro intenso e incluso negro con manchas blanquecinas, lo cual indica un proceso de descomposición avanzada y una buena estabilización del material orgánico.

El cambio de color durante la biodegradación de los residuos orgánicos, ayuda a entender que es un indicador visual importante del avance del compostaje ya que refleja la formación de compuestos como melanoidinas resultado del proceso de humificación de la materia orgánica (Gutiérrez-González et al., 2024).

4.4. Humedad

Los tratamientos de compostaje son el factor más importante y significativo que afecta la humedad del compost ($p < 0.0001$), hay diferencias significativas en la humedad entre las diferentes

réplicas del experimento ($p < 0.0001$), lo que sugiere una variabilidad inherente no controlada a nivel de pila. No hay efecto de la posición o lado ($p = 0.5341$) y la interacción entre la réplica y el tratamiento es significativa ($p < 0.0001$). Esto significa que el efecto de un tratamiento en la humedad puede variar dependiendo de la réplica específica. Esto sugiere que, aunque los tratamientos tienen un gran impacto, las condiciones específicas de cada pila también juegan un papel en cómo se manifiesta ese impacto en la humedad. Esto conforme a los resultados del análisis de varianza en la Tabla 13.

Tabla 13

ADEVA para la variable de Humedad del estudio

F.V.	SC	GI	CM	F	p-valor
Modelo	204057.53	71	2874.05	42.88	<0.0001
Repetición	29389.79	5	3877.96	57.85	<0.0001
Tratamiento	168401.93	2	84200.96	1256.17	<0.0001
Lado	146.87	3	48.96	0.73	0.5341
Repetición*tratamiento	8946.86	10	894.69	13.35	<0.0001
Repetición*lado	37.43	15	2.50	0.04	>0.9999
Tratamiento*lado	73.05	6	12.17	0.18	0.9819
Repetición*tratamiento*lado	99.89	30	3.33	0.05	>0.9999
Error	40083.96	598	67.03		
Total	244141.49	669			

En la Figura 18, se observa la variación en el comportamiento de cada repetición, dentro de los tratamientos evaluados con respecto a la humedad. El T1 presentó valores más altos de retención de humedad, con un rango entre 38.88 % y 66.13 % en sus réplicas, lo que evidencia una respuesta significativamente superior según el análisis de varianza. El tratamiento T2 mostró valores intermedios, con porcentaje de humedad 20.61 % y 37.18 %. Por su parte, el tratamiento T3 utilizado como testigo registró los valores más bajos con un rango de 9.48 % y 12.70 %. Las diferencias entre tratamientos fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$) lo que confirma la superioridad del T1 en términos de retención de humedad.

Las réplicas muestran una variabilidad inherente, hay diferencias notables en los niveles de humedad general entre las diferentes réplicas, lo que indica algunos factores no controlados o condiciones iniciales que influyen en cada unidad experimental. El efecto de los tratamientos no es uniforme en todas las réplicas, si bien la clasificación de los tratamientos ($T1 > T2 > T3$) se mantiene, la magnitud de las diferencias de humedad entre los tratamientos varía de una réplica a otra. Esta interacción significa que, si bien un tratamiento tiene un efecto predecible, el porcentaje exacto de humedad que logra puede variar según la réplica específica.

En el estudio de Gama (2024), se reportaron niveles de humedad que fluctuaron entre el 40 % y el 70 %, valores que coinciden con los obtenidos en el tratamiento T1 del presente estudio, donde se utilizaron pilas con ventilación pasiva. Sin embargo, aunque los rangos de humedad fueron similares, las condiciones de los materiales utilizados fueron distintas.

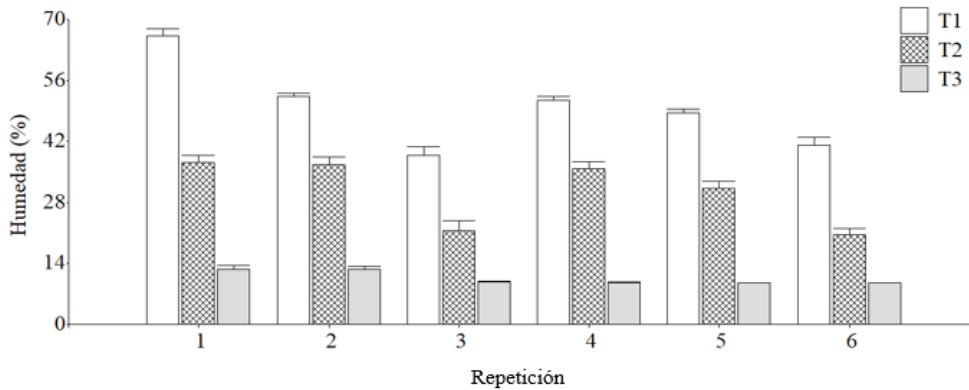
En el tratamiento T1 de esta investigación se empleó una inoculación biológica a base de hongos, bacterias benéficas aplicadas sobre residuos florícolas, los cuales son materiales con mayor contenido fibroso y menor proporción de humedad libre. En cambio, el estudio comparado utilizó estiércoles como inoculantes que coincidían con bacterias y hongos, inoculados en el estudio de Gama, se mezcló en residuos de frutas, que tienden a ser más húmedos y fácilmente degradables debido a su alto contenido de azúcares.

Estas diferencias tanto en el tipo de inoculante como en la naturaleza de los residuos orgánicos influyen directamente en la dinámica de humedad durante el proceso de compostaje. Además en los tratamientos T2 y T3 de la investigación se observaron niveles más bajos de humedad, posiblemente debido a un armado distinto de pilas y a una inoculación menos homogénea.

De acuerdo con Chávez y Tréboles (2023), la humedad en compostajes con residuos florícolas tiende a ser menor debido a su composición más fibrosa y menos jugosa, mientras que con los residuos de frutas elevan la húmedas por su alto contenido de agua y más rápida descomposición.

Figura 18

Variación de la humedad a través de los tres tratamientos y su repetición.



Nota: En la gráfica, T1 corresponde al tratamiento con pilas de compostaje con ventilación pasiva; T2 representa el tratamiento bajo el método finca; y T3 corresponde al testigo.

4.5. Olor

Hay una relación estadísticamente significativa entre los diferentes tratamientos de compostaje y la intensidad del olor que presenta el compost ($p < .0001$). Esto significa que la forma en que se maneja el compostaje afecta directamente si el compost tendrá un olor alto, medio o bajo. La asociación entre los tratamientos (0.40) y la intensidad del olor (0.57) es de fuerza moderada. Esto implica que, aunque los tratamientos influyen en el olor, puede haber otros factores o variabilidad que también contribuyan a la intensidad del olor percibida.

La prueba de Chi-cuadrado para la independencia se detallan en la Tabla 14.

Tabla 14

Análisis de independencia para la variable olor con tres niveles de intensidad

Estadístico	Valor	Gl	P
Chi Cuadrado Pearson	71.59	34	0.0002
Chi cuadrado MV-G2	85.40	34	<0.0001
Coef. Conting. Cramer	0.40		
Coef. Conting. Pearson	0.57		

Nota: Los niveles de intensidad evaluados para la variable de olor fueron: alto, medio, bajo.

El Tratamiento 1 presentó olor alto y medio predominantemente mientras que T2 fue bajo y medio considerablemente, aunque también presenta un nivel alto en algunas réplicas. El tratamiento 3 lo presentó predominante bajo, consistentemente el que produce la menor intensidad.

A diferencia del estudio por Martínez y Martínez (2022), donde todos los tratamientos presentaron un olor homogéneo a tierra y vegetación, en el presente trabajo se observó una mayor variabilidad, con un 55,3 % de muestras clasificadas con olor bajo. Esta diferencia puede atribuirse al diseño geométrico de las pilas, que influye en la aireación y, por tanto, en la generación de compuestos odoríferos. No obstante, la predominancia del olor bajo sugiere que el proceso fue mayormente aeróbico y que el compost alcanzó un grado aceptable de madurez.

Los malos olores se producen en residuos orgánicos que provienen principalmente de ácidos orgánicos volátiles y sulfuro de hidrógeno, especialmente al inicio del compostaje. Durante la fase termófila, las condiciones anaerobias favorecen la producción de compuestos olorosos como la piridina. A medida que el compost madura, estos olores desaparecen y se reemplazan por un aroma terroso debido a la presencia de geosmina (Gutiérrez-González et al., 2024).

4.6. Porosidad

Los resultados indican que no existe una relación estadísticamente significativa entre los tratamientos de compostaje y los niveles de porosidad evaluados ($p=0.375$; $p=0.7419$). Esto indica que la distribución de los compost en estas categorías de porosidad es similar entre los tratamientos, y las diferencias observadas son probablemente debidas al azar del muestreo. En la Tabla 15 se observan los datos de la prueba de Chi-cuadrado para la independencia.

En el análisis de la variable porosidad, los tratamientos T2 Y T3 mostraron una porosidad homogénea clasificada como (ligera) en el 100 % de las réplicas, lo cual indica una adecuada aireación del material, favoreciendo el proceso de compostaje aeróbico. En contraste, el tratamiento T1 presentó mayor variabilidad, con un 83,3 % de las réplicas clasificadas como medio y 16,7 % como pesado, lo que sugiere una posible compactación del compost en una de las réplicas. A pesar de que el análisis estadístico no arrojó diferencias significativas entre tratamientos, el coeficiente de contingencia evidenció una asociación fuerte entre los tratamientos y los niveles de porosidad.

Estos resultados coinciden con lo establecido por Fertilab (s.f.) que menciona que una porosidad libre va entre (35 % y 60 %) ya que permite una buena oxigenación del material y un desarrollo eficiente de los microorganismos esenciales para una descomposición adecuada. Cansio (2024) por su parte observó que el desempeño aeróbico y la madurez del compost a través del pH, olor, textura y materia orgánica, sugieren una estructura porosa aceptable para fines agrícolas.

Tabla 15

Análisis de independencia para la variable porosidad clasificada en niveles de evaluación

Estadístico	Valor	G1	P
Chi Cuadrado Pearson	36.00	34	0.3751
Chi cuadrado MV-G2	28.32	34	0.7419
Coef. Conting. Cramer	0,82		
Coef.Conting. Pearson	0.82		

Nota: Los niveles de porosidad evaluados fueron: ligero, medio, pesado y turboso

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Los tratamientos T2 (con microorganismos) y T3 (testigo) demostraron mayor eficiencia en el compostaje, alcanzando temperaturas superiores (64-70 °C) debido a una elevada actividad microbiana inoculada y nativa. Esto valida la efectividad de los bioaceleradores en la higienización y descomposición, superando al T1 (45-56 °C).

El pH del compost no se vio significativamente influenciado por los tratamientos aplicados. Sin embargo, las diferencias sugieren que factores no controlados pudieron afectar su comportamiento. A pesar de estas variaciones, el pH se mantuvo consistentemente en un rango ácido moderado (5.70 a 6.24), ideal para el proceso de compostaje.

El color externo del compost fue un indicador clave de la maduración y estabilidad, mostrando que T2 y T3 tuvieron un impacto notable en este aspecto porque produjeron colores internos más oscuros y homogéneos, señal de una descomposición más avanzada que sugiere una mayor calidad del producto final. En contraste, T1 presentó mayor variabilidad cromática, posiblemente por fermentación incompleta o exceso de humedad.

Los tratamientos de compostaje influyeron significativamente en la retención de humedad: T1 fue el más efectivo, seguido por T2, y T3 con los valores más bajos. Aunque el orden se mantuvo, la magnitud del efecto varió entre réplicas, lo que sugiere que factores no controlados en cada pila afectaron el comportamiento hídrico del compost. Esta variabilidad subraya la importancia de considerar estas influencias externas.

El testigo fue el más efectivo en reducir el olor, con niveles bajos. T2 (con microorganismos) mostró olores bajos a medios, mientras T1 tuvo los más altos. Esto indica que la eficiencia del proceso en T3 y la actividad microbiana en T2 favorecen una descomposición más aeróbica, limitando compuestos desagradables. Para T1 se sugiere condiciones anaeróbicas o desequilibrio C/N, lo que implica que factores intrínsecos del proceso pueden ser más influyentes que la adición de inoculantes en el control del olor.

Aunque los tratamientos no afectaron significativamente la porosidad, T2 y T3 promovieron una porosidad más homogénea y ligera, favoreciendo la aireación. T1, en contraste, mostró mayor variabilidad y signos de compactación. Esto sugiere que, a pesar de la no significancia estadística, T2 con microorganismos y T3 resultaron en una mejor estructura física del compost.

5.2 RECOMENDACIONES

Promover el uso de tratamientos con microorganismos eficientes como en el tratamiento T2. Dado su mejor desempeño térmico, visual y sensorial, son eficientes para acelerar la descomposición, aumentar la uniformidad del compost y reducir malos olores.

El tratamiento T1 retuvo más humedad, pero no siempre bajo condiciones óptimas, es recomendable ajustar la humedad inicial para evitar zonas anaeróbicas o exceso de compactación, que interfieren con la aireación y el desarrollo microbiano.

Aun cuando no fueron influyentes en la porosidad del compost, los tratamientos T2 y T3 favorecieron una estructura más homogénea. Se recomienda usar mezclas con alta porosidad desde el inicio y, evitar materiales que permitan una compactación excesiva

Las variaciones significativas entre réplicas en cuanto a pH, humedad y olor, sugieren que se deben estandarizar con mayor precisión factores como la proporción de ingredientes, el tamaño de partícula, la compactación y el régimen de volteo.

Incluir seguimiento de oxígeno, dióxido de carbono o actividad enzimática para interpretar con más precisión fenómenos como los malos olores o las diferencias de color interno.

Incorporar análisis de madurez, presencia de patógenos o capacidad fertilizante para aportar una evaluación más integral del rendimiento de los tratamientos.

En vista de que se analizaron las interacciones por lado y punto de muestreo, se pueden considerar mapas térmicos o perfiles verticales del compost para estudiar la evolución interna en tiempo real.

BIBLIOGRAFÍA

- AGRONET. (2023). *La importancia de la cal en la agricultura: beneficios para el suelo y las plantas*. <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/La-importancia-de-la-cal-en-la-agricultura-beneficios-para-el-suelo-y-las-plantas.aspx>
- Aliahmad, A., Kanda, S. y McConville, J. (2023). Diffusion barriers and improvement potential; case studies from Sweden and Switzerland. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137583. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137583>
- Alomari, S., Hasan, R. S., Al-Najim, A. N. y Saadi, A. M. (2024). Nitrogen-fixing bacteria and their applications in the environment: a review. *International Journal of Medical and All Body Health Research*, 5(4), 178-187. <https://doi.org/10.54660/IJMBHR.2024.5.4.178-187>
- Angulo, J. C. y Lizonde, P. S. (2020). *Revisión bibliográfica del uso de los microorganismos eficientes en la obtención de compost orgánico*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/53159>
- Bone, B. X. (2023). *Plan de gestión integral de residuos sólidos agropecuarios en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana] Repositorio Institucional UPS. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28627>
- Callejo, A. (2021). *Uso de cama acumulada de compost (1ª parte)*. Engormix: https://www.engormix.com/lecheria/cama-vacas-lecheras/uso-cama-acumulada-compost_a47168/
- Cancio, R. D. (2024). *Evaluación de la calidad de compost producido con diferentes proporciones de residuos vegetales de mercado y plantas acuáticas, Huacho 2022*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Repositorio Institucional UNJFSC. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/8972/TESIS%20COMP%20OSTAJE%20ROCIO%20CANCIO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chávez, M. J. y Tréboles, K. J. (2023). *Evaluación de la eficiencia del proceso de compostaje a partir de diferentes tamaños de residuos orgánicos, como alternativa de manejo de desechos de la actividad florícola, Cayambe, 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24312/1/TTS1174.pdf>
- Chopkova, V., Petkova, M. y Shilev, S. (2023). Uncovering bacterial diversity during mesophilic and thermophilic phases of biowaste composting through next-generation sequencing. *Applied Sciences*, 13, 3111. <https://doi.org/10.3390/app13053111>
- Código Orgánico del Ambiente. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*. Registro Oficial Suplemento 983. <https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2022/05/if-are-digeim-opi-2021-0008-o-anexo-2-codigo-organico-ambiente.pdf>
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Registro Oficial* 449. https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf

- Fertilab. (s.f.). *Interpretación de Resultados de textura y humedad del suelo*. Fertilab.
<https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/INTERPRETACION%20DE%20RESULTADO%20DE%20TEXTURA%20Y%20HUMEDAD%20DEL%20SUELO.pdf>
- Gama, A. (2024). *Eficiencia de las dosis de microorganismos eficaces en el proceso de compostaje de residuos orgánicos*. Pucallpa, Ucayali, Perú-2024. [Tesis de pregrado, Universidad nacional de Ucayali]. Repositorio Institucional UNU.
<https://hdl.handle.net/20.500.14621/7241>
- Garay-Peralta, I., Herrera, J., Fernández, J. A., Díaz, A. y Domínguez, E. Y. (2022). Contaminación en el suelo por uso irracional de agroquímicos y sus repercusiones en la salud. *Conferencia VII Congreso de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología*, (pp. 213-219).
<https://doi.org/10.47300/actasidi-unicyt-2022-34>
- Garzón, I., Cruz, E. C., Infante, A. y Cuervo, J. L. (2022). Efecto del compost de residuos de flores sobre algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Acta Agronómica*, 71(2), 111-118. <https://doi.org/10.15446/acag.v71n2.88900>
- Glushakova, A. M. y Kachalkin, A. V. (2023). Yeast community succession in cow dung composting process. *Fungal Biology*, 127(6), 1075-1083.
<https://doi.org/10.1016/j.funbio.2023.06.001>
- Gutiérrez-González, L. S., Ojeda-Barrios, D. L., Ávila-Quezada, G. D. y Hernández-Rodríguez, O. A. (2024). Características cambiantes durante el compostaje y valores indicativos de calidad en el producto final. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 40(2), 467-484.
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0719-38902024000200467
- Hernández-Saavedra, N. Y. (2021). Las levaduras y su ecología: ¿existen las levaduras marinas? *Revista Digital de Divulgación Científica*, 7(1), 59-86.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2021.07.07.01.0004>
- Idrovo, J. C. (2020). *Compostaje de residuos procedentes de la industria florícola en Ecuador. Empleo agrícola y para la biorremediación ambiental de los compost obtenidos*. [Tesis Doctoral, Universidad Miguel Hernández de Elche]. Repositorio Institucional UMHE.
<https://hdl.handle.net/11000/25514> Revisar en las normas APA cómo se pone la tesis en las referencias y arreglar
- Jaimes-Díaz, H. G., Suárez-Chacón, I. y Torres-Romero, J. C. (2021). El compostaje: una alternativa para la recuperación de suelos contaminados por agroquímicos para el pequeño productor. *Ciencias Agropecuarias*, 7(1), 51-67.
file:///C:/Users/WIND%2010/Downloads/Dialnet-ElCompostaje-8658125.pdf
- Jurado, E. (2021). *Efecto de la temperatura sobre la calidad del compost de residuos sólidos orgánicos mejorado con microorganismos eficaces – Distrito de Huamancaca Chico*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.
<https://www.academia.edu/95178369>

- Kong, Z., Wang, H., Yan, G., Yan, Q. y Kim, J. R. (2023). Limited dissolved oxygen facilitated nitrogen removal at biocathode during hydrogenotrophic denitrification using a bioelectrochemical system. *Bioresource Technology*, 372, 128662. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128662>
- Ley de Gestión Ambiental. (1999). *Registro Oficial* 245. <http://www.iacseaturtle.org/docs/marco/Ecuador/Ecuador%20-%20Ley%20de%20Gestion%20Ambiental.pdf>
- Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua. (2014). *Registro Oficial Suplemento* 305. <https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/2019/06/Ley-Org%C3%A1nica-de-Recursos-H%C3%ADricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf>
- Martínez, L. y Martínez, E. (2022). *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)*. [Tesis de pregrado, Universidad de Córdoba]. Repositorio Institucional UNICORDOBA. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/6df9881a-b770-4486-995d-5269e1082756/content>
- Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2015). *Normas Técnicas de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. https://www.efficacitas.com/efficacitas_es/assets/Anexo%206.pdf
- Monotoa-Mejía, J. O., Auz, M. J. y Ayala, A. A. (2022). Investigación del sector floricultor y su impacto en el desarrollo económico del Ecuador. *ISTE SCIENTIST*, 1(2), 1-17. <https://revistas.iste.edu.ec/index.php/reviste/article/view/11/7>
- Mullisaca Contreras, E., Fernández Ochoa, B. H., García Espinoza, C., Taquire Arroyo, A. F., & Soncco Vilcapaza, W. M. (2023). *Evaluación del tiempo y calidad del compost obtenido a partir de una mezcla de residuos sólidos orgánicos con o sin adición de Saccharomyces cerevisiae*. *Ñawparisun: Revista de Investigación Científica de Ingenierías*, 4(2), 1-12. <https://unaj.edu.pe/revista/index.php/vpin/article/download/245/155/658>
- Muñoz, J. Z., Ricardi, R., Quispe, E. D., Uscuchagua, M. D. y Aguilar, R. F. (2025). Valorización de los residuos avícolas (cadáveres de pollos y gallinaza), en la elaboración de Compost – Pichanaki - Perú. *Yotantsipanko*, 5(1), 9-20. <https://doi.org/10.54288/yotantsipanko.v5i1.51>
- Ngamcharungchit, C., Chaimusik, N., Panbangred, W., Euanorasetr, J. y Intra, B. (2023). Bioactive metabolites from terrestrial and marine actinomycetes. *Molecules*, 28(15), 5915. <https://doi.org/10.3390/molecules28155915>
- Noor, R. S., Shah, A. N., Tahir, M. B., Umair, M., Nawaz, M., Ali, A., Ercisli, S., Abdelsalam, N., Ali, H. M., Yang, S., Ullah, S. y Assiri, M. A. (2024). Recent trends and advances in additive-mediated composting technology for agricultural waste resources: A comprehensive review. *ACS Omega*, 9(8), 8632-8653. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06516>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*.

- <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/86a00877-877d-4fa7-8608-32071e1464d8/content>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*.
https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf
- Parada, R. (2021). *Actinomicetos: qué son, características, medios de cultivo, ejemplos*. Lifeder:
<https://www.lifeder.com/actinomicetos/>
- Pardo-Díaz, S., Suárez-Estrada, M., Camelo-Rusinque, M., Rojas-Tapias, D. y Estrada-Bonilla, G. (2024). *Guía de compostaje para agricultores*. AGROSAVIA:
<https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7407808>
- Pérez-Corral, D. A., Ornelas-Paz, J. J., Olivas-Orozco, G. I., Acosta-Muñiz, C. H., Salas-Marina, M. A., Berlanga-Reyes, D. I., Ruiz-Cisneros, M. F. y Rios-Velasco, C. (2022). Molecular, morphological and biochemical characterization of actinomycetes and their antagonistic activity against phytopathogenic fungi. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(1), 103-115.
<https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/45-1/11a.pdf>
- Puntocompost. (s.f.). *Guía de compostaje*. <https://puntocompost.wordpress.com/productos/>
- Rawat, P., Das, S., Shankhdhar, D. y Shankhdhar, S. C. (2021). Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 49-68. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>
- Rivera Miiko, C., Carcaela Edy Morales, E., & Morales Aranibar, L. F. (2020). *Composition process for Saccharomyces cerevisiae at an educational institution in Peru*. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/344134339_COMPOSITION_PROCESS_FOR_SACCHAROMYCES_CEREVISIAE_AT_AN_EDUCATIONAL_INSTITUTION_IN_PERU
- Santos, E. G. (2021). *Aprovechamiento de los residuos generados en la industria de la floricultura para la producción de etanol y furfural*. [Tesis de pregrado, Universidad Jorge Tadeo Lozano]. Repositorio Institucional UTADEO.
<https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/22274>
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021). *Plan Nacional de Desarrollo 2021–2025: Gobierno del Encuentro*.
<https://iste.edu.ec/wp-content/uploads/2022/08/PLAN-NACIONAL-DE-DESARROLLO-2021-2025.pdf>
- Tola, D. N., López, M. A. y Limachi, I. M. (2024). Dinámica de propiedades físicas y químicas del proceso de compostaje con diferentes dosis de microorganismos eficientes. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 11(3), 60-71.
<https://doi.org/10.53287/oaht6256yt72p>
- Topatan, Z. Ş. y Kati, H. (2022). Screening of actinomycetes from *Cystoseira barbata* (Stackhouse) *C. agardh* compost for their enzyme and antibacterial activities. *Trakya University Journal of Natural Sciences*, 23(2), 113-124.
<https://doi.org/10.23902/trkjnat.1059974>

- US Composting Council. (2017). *Test Methods for the Examination of Compost and Composting (TMECC)*. USCC.
<https://www.compostingcouncil.org/page/TMECC>
- Vallejo, A. (2021). *Análisis de la sostenibilidad agroecológica, socio territorial de cuatro tipos de productores agropecuarios de la zona baja de la parroquia de Cangahua en el cantón Cayambe, Ecuador*. [Presentación en papel]. Sistema de Investigación de la Problemática Agraria en el Ecuador (SIPAE). Ecuador.
<https://www.researchgate.net/publication/350706400>
- Vandecasteele, B. (2023). Oxygen uptake rate versus CO₂ respiration rate for evaluating biological stability of peat, plant fibers and woody materials with high C:N ratio versus composts. *Waste Management*, 167, 54-80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.019>
- Vats, S., Srivastava, P., Saxena, S., Mudgil, B. y Kumar, N. (2021). Beneficial effects of nitrogen-fixing bacteria for agriculture of the future. En K. Vishwakarma, D. K. Choudhary, & A. Varma (Edits.), *Soil Nitrogen Ecology. Soil Biology* (Vol. 62, págs. 305-325). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-71206-8_15
- Yi, P., Li, Q., Zhou, X., Liang, R., Ding, X., Wu, M., Wang, K., Li, J., Wang, W., Lu, G. y Zhu, T. (2024). Inoculation of *Saccharomyces cerevisiae* for facilitating aerobic composting of acidified food waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 55507–55521.
<https://doi.org/10.1007/s11356-024-34876-5>
- Zhao, Y., Cai, J., Zhang, P., Qin, W., Lou, Y., Liu, Z. y Hu, B. (2022). Core fungal species strengthen microbial cooperation in a food-waste composting process. *Environmental Science and Ecotechnology*, 12, 100190. <https://doi.org/10.1016/j.es.2022.100190>
- Zhu, L., Wang, X., Liu, L., Le, B., Tan, C., Dong, C., Yao, X. y Hu, B. (2024). Fungi play a crucial role in sustaining microbial networks and accelerating organic matter mineralization and humification during thermophilic phase of composting. *Environmental Research*, 254, 119155. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119155>