



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Automatización de un Compostador de uso
Doméstico**

presentada por

Ing. Gerardo Galileo Reyes Hernández

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias de la Ingeniería

Directora de tesis

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo

Codirector de tesis

Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez

Cuernavaca, Morelos, México. Abril de 2026



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Coordinación de Ciencias de la Ingeniería

Cuernavaca, Mor., 29/ abril/ 2026

OFICIO No. MCI/027/2026

CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

Asunto: **Aceptación de documento de tesis**

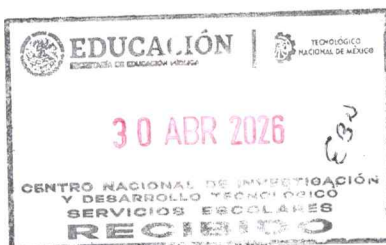
DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del estudiante **GERARDO GALILEO REYES HERNÁNDEZ**, con número de control M23CE132, de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **"AUTOMATIZACIÓN DE UN COMPOSTADOR DE USO DOMÉSTICO"** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DR. GLORIA LILIA OSORIO GORDILLO
Directora de tesis

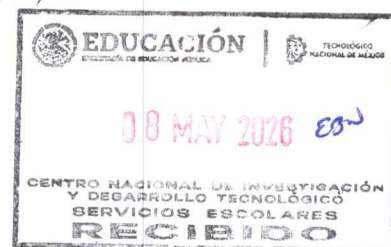
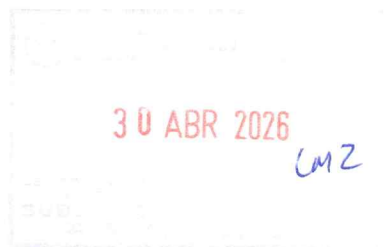
DR. RODOLFO AMALIO VARGAS MÉNDEZ
Codirector de Tesis

DR. JUAN REYES REYES
Revisor 1



DR. CARLOS MANUEL ASTORGA
ZARAGOZA
Revisor 2

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante
JAL/ang



2026
año de
Margarita
Maza

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Apatzingán 212, Palmira, 62490 Cuernavaca, Mor., México

Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4106,

e-mail: coord.ingenieria@cenidet.tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, **30/abril/2026**

Oficio No. SAC/115/2026

Asunto: Autorización de impresión de tesis

GERARDO GALILEO REYES HERNÁNDEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"AUTOMATIZACIÓN DE UN COMPOSTADOR DE USO DOMÉSTICO"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

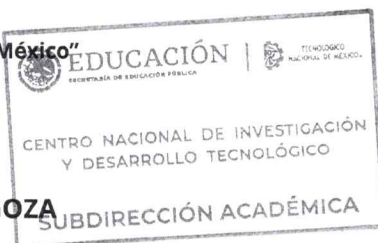
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Coordinación de Ciencias de la Ingeniería
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2026
año de
Margarita
Maza



Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a las personas e instituciones que hicieron posible la culminación de este trabajo.

A las Instituciones y Entidades de Apoyo

Mi sincero reconocimiento a la **SECIHTI**, por el apoyo financiero brindado a través de la beca de posgrado, sin el cual la realización de esta investigación no habría sido posible. A las autoridades del Tecnológico Nacional de México y del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por proveer el ambiente y los recursos para el desarrollo de mi proyecto.

A la Comunidad Académica

Extiendo mi gratitud a mis directores de tesis, la **Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo** y el **Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez**, por su invaluable guía, paciencia, dedicación y apoyo constante a lo largo de este camino. Su experiencia y conocimientos fueron fundamentales para superar los desafíos técnicos y metodológicos de esta investigación.

Asimismo, agradezco profundamente al **Dr. Juan Reyes Reyes** y al **Dr. Carlos Astorga Zaragoza** por sus valiosas aportaciones, tiempo y comentarios críticos, que enriquecieron significativamente el contenido y el rigor de este trabajo.

A mi Familia

Finalmente, mi reconocimiento más emotivo y especial a mi familia, por su amor incondicional, comprensión y aliento diario. A mi esposa, **Ana**, por su apoyo inquebrantable, su paciencia y por ser mi pilar durante todo este proceso. A mis hijos, **Emiliano y Sofía**, quienes con su alegría fueron mi mayor motivación. Y de manera muy especial, a mis queridos **padres**, por su fe incondicional en mis capacidades, por los sacrificios que hicieron a lo largo de mi vida, y por haberme inculcado los valores de la perseverancia y el rigor. Este logro es, en gran medida, el resultado de sus enseñanzas y de su apoyo constante en cada etapa de mi vida.

Resumen

El presente trabajo de tesis aborda una problemática central en la gestión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en contextos urbanos, donde la fracción orgánica constituye una porción significativa que en su mayoría es destinada a rellenos sanitarios. A pesar de que el compostaje doméstico descentralizado se reconoce como una práctica efectiva de economía circular, con el potencial de reducir el desvío de materia orgánica entre un 80% y 90%, su escalabilidad se ve obstaculizada por limitaciones operacionales y de infraestructura, como la escasez de espacio físico en viviendas urbanas y la complejidad en el control de variables del proceso inherentes a los métodos tradicionales.

La investigación se justifica por la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas compactas y eficientes que permitan la revalorización de residuos orgánicos a nivel familiar. El objetivo principal se orienta al diseño e implementación de un sistema de compostaje automatizado, concebido para mitigar las restricciones de espacio y manejo asociadas a las prácticas convencionales.

Para tal fin, la metodología se estructura en torno a la automatización del compostador, obedeciendo el comportamiento de las variables críticas del proceso, incluyendo humedad, temperatura, aireación y homogeneización. El desarrollo del sistema comprende el diseño de la estructura física del compostador, la integración de componentes electrónicos y sensores (como la placa Arduino Uno R3 y el sensor AM2305), y la programación de un sistema de automatización con el monitoreo de las etapas del compostaje y gestionar la rotación mecánica del sustrato. Los ciclos de experimentación están diseñados para generar resultados cuantificables sobre la evolución temporal de la temperatura, la duración de las distintas fases y la reducción de volumen, permitiendo una evaluación comparativa frente al método tradicional. En última instancia, la tesis busca determinar la aplicabilidad del sistema automatizado en entornos domésticos y ofrecer una contribución tecnológica directa a una gestión de residuos sostenible.

Abstract

This thesis addresses a central problem in the management of Municipal Solid Waste (MSW) in urban contexts, where the organic fraction constitutes a significant portion, most of which is sent to landfills. Although decentralized home composting is recognized as an effective circular economy practice, with the potential to reduce organic waste by 80% to 90%, its scalability is hampered by operational and infrastructure limitations, such as the scarcity of physical space in urban homes and the complexity of controlling process variables inherent in traditional methods.

This research is justified by the need to develop compact and efficient technological solutions that allow for the valorization of organic waste at the household level. The main objective is the design and implementation of an automated composting system, conceived to mitigate the space and management constraints associated with conventional practices.

To this end, the methodology is structured around the automation of the composter, taking into account the behavior of critical process variables, including humidity, temperature, aeration, and homogenization. The system development encompasses the design of the composter's physical structure, the integration of electronic components and sensors (such as the Arduino Uno R3 board and the AM2305 sensor), and the programming of a control system to monitor the composting stages and manage the mechanical rotation of the substrate. The experimental cycles are designed to generate quantifiable results regarding the temporal evolution of temperature, the duration of the different phases, and volume reduction, allowing for a comparative evaluation against the traditional method. Ultimately, the thesis seeks to determine the applicability of the automated system in domestic settings and offer a direct technological contribution to more sustainable waste management.

Contenido

Capítulo I	1
1. Antecedentes	1
1.1. Planteamiento del Problema	2
1.2. Justificación	5
1.3. Objetivos	8
1.3.1. Objetivo General	8
1.3.2. Objetivos Específicos	8
1.4. Alcances y Limitaciones	8
1.4.1. Limitaciones y desafíos en la implementación	10
1.5. Aportación	11
1.6. Estructura del Documento	12
Capítulo II	15
2. Marco Teórico	15
2.1. Conceptualización del compostaje	15
2.2. Etapas involucradas en el proceso de descomposición	15
2.2.1. Fase inicial o mesófila	16
2.2.2. Fase termófila	16
2.2.3. Fases de enfriamiento y maduración	17
2.3. Parámetros críticos que intervienen en el proceso de compostaje	18
2.4. Microorganismos involucrados en el proceso del compostaje	20
2.4.1. Influencia del Sustrato y las Condiciones del Proceso	22
2.4.2. Factores que influyen en la actividad microbiana	23
2.4.3. Sucesión microbiana durante el compostaje	24
2.4.4. Dinámica de la Diversidad Alfa y Beta	26
2.4.5. Factores Ambientales Conductores de la Sucesión	27
2.4.6. Cambios Funcionales y Metabólicos	29
2.4.7. Conceptualización del compostaje desde la microbiología	29
2.4.8. Factores que determinan la dinámica microbiana	30
2.5. Automatización en la gestión de residuos orgánicos	31
Capítulo III	34
3. Estado del Arte	34
3.1. Relación entre microbiología y automatización del compostaje	34
3.2. Estudios sobre Automatización Aplicada a Procesos de Residuos	36
3.3. Estudios relacionados con el compostaje en general	37
3.4. Estudios relacionados con la automatización	41
3.5. Estudios relacionados con la Microbiología	43
Capítulo IV	47
4. Metodología de Solución	47
4.1. Selección de variables a automatizar	47

4.1.1. Humedad	49
4.1.2. Temperatura	49
4.1.3. Aireación y homogeneización	50
4.2. Diseño del compostador automatizado	50
4.2.1. Estructura física	50
4.2.2. Instrumentación del compostador	54
4.2.3. Materiales adicionales utilizados	59
4.3. Sistema de automatización	64
4.3.1. Programación del sistema de sensores y almacenamiento de la información	67
4.3.2. Programación de funciones para cada etapa del compostaje	67
Código 1. Función para detectar las etapas, implementada en la programación	68
Código 2. Función para detectar las etapas, implementada en la programación	68
4.3.3. Programación del sistema de control de rotación	69
Código 3. Función para activar la controladora DM556 y lograr los medios giros del compostador.	70
4.4. Diseño de ciclos de experimentación	71
4.4.1. Protocolo Experimental	71
Capítulo V	81
5. Resultados	81
5.1. Evolución temporal de temperatura	81
5.2. Duración temporal por etapas	85
5.3. Tiempo total requerido por ciclo	87
5.4. Reducción de Volumen	89
5.5. Evaluación del producto final	90
5.6. Comparativa con método tradicional	93
Capítulo VI	95
6. Análisis y Discusión	95
6.1. Interpretación de resultados	95
6.2. Limitaciones del estudio y oportunidades de mejora	97
6.3. Aplicabilidad del sistema en entornos domésticos	98
6.3.1. Ventajas	98
6.3.2. Barreras	99
Capítulo VII	101
7. Conclusiones	101
7.1. Recomendaciones para futuras investigaciones	103
7.1.1. Profundización en el Control Fino de Variables Bioquímicas	103
7.1.2. Eficiencia Energética y Diseño Mecánico	103
7.1.3. Escalabilidad y Adaptación a Contextos Diversos	104
7.1.4. Validación de Largo Plazo y Evaluación de la Interfaz Humano-Máquina	104
8. Referencias	105
9. Anexos	110
Anexo A: Código fuente:	110

Anexo B: Datos de temperatura arrojados por el compostador	115
Anexo C: Póster Publicado	116
Anexo D: Artículo Publicado	118

Índice de figuras.

Fig. 1. Desperdicios orgánicos que son desechados con el resto de la basura, debido a falta de políticas de separación de residuos.	5
Fig. 2. Duración estimada de cada fase del proceso de compostaje en un ambiente convencional.	18
Fig. 3. Rangos mínimos y máximos tanto para humedad y temperatura para cada etapa.	20
Fig. 4. Nivel relativo de actividad microbiana en cada una de las etapas del proceso de compostaje. Proporciona una representación conceptual del nivel relativo de actividad y la predominancia de los principales consorcios microbianos que median el proceso de compostaje.	22
Fig. 5. Rangos aproximados de pH en cada etapa del proceso de compostaje.	28
Fig. 6. Algunos modelos de compostadores automatizados disponibles en el mercado.	34
Fig. 8. Compostador prefabricado con formato octogonal. Se aprecian las muescas que hacen la función de deflectores internos.	51
Fig. 9. Motor NEMA23 instalado en el compostador. Se agregó un sistema de estrellas y cadena de bicicleta con relación 3:1.	52
Fig. 10. Deflectores internos. Estas placas dirigen el movimiento y homogeneizan el sustrato orgánico durante la rotación.	53
Fig. 11. Placa Arduino Uno R3. Constituye el dispositivo principal de control del compostador.	55
Fig. 12. Sensor AM2305 instalado en el interior del compostador. Fue fijado utilizando cinchos plásticos.	56
Fig. 13 Componentes conectados a la placa Arduino Uno R3 mediante cables Dupont y Protoboard.	57
Fig. 14 Driver de control DM556 conectado al motor NEMA23	58
Fig. 15 Se muestra la arquitectura completa con tres capas claramente diferenciadas.	59
Fig. 16. Muestra los diferentes componentes mencionados fijados a la tabla de MDF y a la estructura del compostador.	60
Fig. 17. Pegamento epóxico utilizado para sellar las pequeñas perforaciones existentes desde la etapa de fabricación.	61
Fig. 18. Cinta americana utilizada para sellar temporalmente pequeñas fugas, inherentes al diseño.	62
Fig. 19. Sello de silicona antihongos aplicado entre las capas que conforman la estructura del compostador.	63
Fig. 20. Báscula de medición y recipiente para volumetría de la materia orgánica inicial.	64
Fig. 21. Diagrama de flujo que representa el funcionamiento general del sistema.	69
Fig. 22. Material inicial, cortado en trozos para su mejor descomposición.	71
Fig. 23. Características organolépticas perceptibles con principios de maduración. Se aprecia su color oscuro y ausencia de olores desagradables.	73
Fig. 24. Evolución de la temperatura durante la primera prueba llevada a cabo en invierno de 2024 con registros cada 3 horas.	83
Fig. 25. Evolución de la temperatura durante la segunda prueba llevada a cabo en primavera de 2025 con registros cada 2 horas.	84
Fig. 26. Evolución de la temperatura durante la tercera prueba llevada a cabo en invierno de 2025 con registros cada 15 minutos.	85
Fig. 27. Comportamiento de las etapas para la 1a Prueba.	87
Fig. 28 Comportamiento de las etapas para la 2a Prueba.	88
Fig. 29. Comportamiento de las etapas para la 3a Prueba.	89

Fig. 30 Se visualiza una conclusión clave del experimento, debido a las limitaciones en la cinética del proceso en el compostador tradicional.	91
Fig. 31. El producto final obtenido muestra una mayor uniformidad, resultado de las rotaciones del compostador y la consecuente homogeneización lograda al activar estos movimientos.	92
Fig. 32 Propuesta de panel para el compostador automatizado que indique la fase activa.	98
Fig. 33 Cuadro comparativo de los compostadores mencionados en el documento actual de tesis.	100

Índice de Códigos

Código 1. Función para detectar las etapas, implementada en la programación	68
Código 2. Función para detectar las etapas, implementada en la programación	68
Código 3. Función para activar la controladora DM556 y lograr los medios giros del compostador.	70

Capítulo I

1. Antecedentes

La creciente concentración poblacional en entornos urbanos ha propiciado un incremento en la generación de residuos domésticos, con la fracción orgánica representando hasta un 50% del total, destinada mayoritariamente a rellenos sanitarios (Araiza et. al., 2017). Si bien, el compostaje constituye una práctica efectiva de economía circular, los métodos tradicionales a menudo presentan limitaciones como la necesidad de espacio, el manejo de olores y el tiempo requerido, lo que dificulta significativamente su adopción en las viviendas urbanas de dimensiones reducidas (Aguilar, 2015).

En este contexto, el compostaje doméstico ha demostrado ser una estrategia viable. Reportes de participantes indican que posibilita una reducción de entre el 80% y el 90% en los residuos enviados a rellenos sanitarios, logrando una desviación significativa de la materia orgánica (Palancar et al., 2021). Más allá de la gestión de residuos, el compostaje descentralizado ofrece beneficios ambientales y económicos cuantificables. Por ejemplo, Tagle-Zamora et al. (2025) estiman que su implementación en León, Guanajuato, podría disminuir entre 68.74 y 824.91 toneladas de CO₂ al año, generando ahorros municipales de entre 2.8 y 34.4 millones de pesos. Además, intervenciones como la descrita por Ricaño Ochoa y Chamorro Zárate (2021) en Colonia Zipor, Xalapa, evidencian un impacto social al fomentar cambios positivos en los hábitos de manejo de residuos y fortalecer la participación comunitaria.

Las experiencias en terreno con el compostaje descentralizado en contextos urbanos constituyen una sólida base para validar su viabilidad y su potencial. Al evaluar su impacto, se confirma que esta práctica abarca positivamente tres dimensiones fundamentales: la ambiental, al reducir significativamente la cantidad de residuos orgánicos destinados a vertederos y mitigar la consecuente generación de gases de efecto invernadero; la económica, al ofrecer una alternativa de bajo costo para el tratamiento de residuos y generar un producto valioso como el compost; y la social, al fomentar la participación comunitaria, la educación ambiental y la creación de redes de colaboración local.

No obstante, para que estos sistemas de compostaje alcancen su máximo rendimiento y se consoliden como una solución sostenible a largo plazo, resulta indispensable abordar y superar los desafíos que persisten. Esto exige un esfuerzo concentrado en dos frentes principales: en primer

lugar, la implementación de estrategias educativas robustas y accesibles. Estas deben ir más allá de la mera instrucción técnica para enfocarse en generar una cultura de responsabilidad compartida y separación en origen, asegurando que los participantes adquieran las habilidades necesarias para un manejo óptimo del proceso. En segundo lugar, es imperativo asegurar un sólido respaldo institucional y político. Las autoridades locales deben proveer el marco normativo adecuado, destinar recursos suficientes (financieros y logísticos) y facilitar soluciones creativas para las persistentes limitaciones técnicas (como el control de lixiviados o la optimización del proceso en pequeña escala) y, de manera viable, para la escasez de espacio físico, que es un desafío endémico en los núcleos urbanos. Solo con esta doble estrategia (educación activa y apoyo institucional) se podrá alcanzar la escalabilidad y sostenibilidad del compostaje descentralizado, maximizando así sus beneficios ecológicos y socioeconómicos.

Por lo tanto, este proyecto se justifica por la necesidad de desarrollar soluciones compactas y eficientes que permitan a las familias urbanas revalorizar sus residuos orgánicos. Esta tesis ofrece una respuesta tecnológica directa, proponiendo un sistema automatizado que busca superar las limitaciones de espacio y manejo inherentes a los métodos tradicionales.

1.1. Planteamiento del Problema

La gestión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en los municipios mexicanos es un desafío multifacético que, históricamente, ha presentado una serie de obstáculos significativos que reducen su eficiencia, salubridad y, sobre todo, su sostenibilidad a largo plazo. La problemática es profundamente compleja, arraigada en una cantidad significativa de factores estructurales, económicos, sociales y regulatorios que interactúan de manera conjunta, dificultando la implementación de soluciones integrales.

Los principales obstáculos en la gestión de los RSU, se articulan en torno a problemas de planificación, limitaciones financieras, debilidades normativas, retos socioculturales y operacionales.

La gestión de RSU adolece de serias fallas de planificación e infraestructura, evidenciadas por la ausencia crítica de una visión a largo plazo que anticipe el crecimiento poblacional y la generación de residuos. Esta deficiencia se ve agravada por una infraestructura obsoleta e ineficiente en los sistemas de recolección y transferencia, lo que resulta en baja cobertura y pérdidas operacionales (Osorio-Hernández et al., 2022; Aguilar et al., 2015). Asimismo, persiste una disposición final deficiente, con una excesiva dependencia de sitios no controlados o rellenos sanitarios mal

diseñados, lo que incrementa significativamente los impactos ambientales negativos como la emisión de lixiviados y gases de efecto invernadero (Castañeda Delgado & Escatel, 2015).

Existen importantes limitaciones económicas y de financiamiento. El sector se enfrenta a una insuficiencia presupuestaria, ya que los recursos municipales asignados rara vez cubren los costos reales de operación, mantenimiento e inversión en tecnología moderna (Cruz Salinas et al., 2023). Esta situación se complica por la Baja Autosuficiencia Financiera del sistema, causada por una baja cultura de pago por parte de la ciudadanía y la ineficacia en los mecanismos de cobro del servicio.

Un grupo de problemas recae en los aspectos normativos y de cumplimiento. Aunque existe un marco regulatorio federal, la aplicación regulatoria es débil y heterogénea a nivel municipal, limitando la capacidad para fiscalizar y aplicar sanciones efectivas. Adicionalmente, la falta de estímulos a la Inversión privada inhibe la participación en el desarrollo e implementación de tecnologías de tratamiento y valorización de residuos.

Finalmente, los retos socioculturales y los obstáculos operacionales son determinantes. La Baja participación ciudadana en iniciativas de separación y reducción de residuos, sumada a un persistente déficit en educación ambiental, dificulta la implementación de prácticas adecuadas de manejo doméstico. Operacionalmente, la baja adopción de tecnología se mantiene como un obstáculo, pues es mínima la implementación de métodos de tratamiento y valorización (como compostaje, biodigestión o termovalorización) que permitirían reducir drásticamente el volumen de residuos enviados a disposición final y aprovechar su potencial material o energético (Osorio-Hernández et al., 2022; Aguilar et al., 2015).

La gestión de RSU en México enfrenta una encrucijada crítica. La imperiosa necesidad de atender las urgencias ambientales y de salud pública choca con las limitaciones operacionales existentes. Esta situación sugiere un cambio de paradigma, orientando la gestión hacia un modelo de economía circular que vaya más allá del simple servicio de recolección y disposición final.

Los desafíos principales en la gestión de RSU se pueden agrupar en cuatro áreas críticas. En primer lugar, se encuentran las deficiencias en infraestructura y operación, caracterizadas por una clara insuficiencia de recursos, como la escasez de vehículos de recolección, contenedores y plantas de tratamiento, lo que resulta en una baja cobertura de los servicios (Osorio-Hernández et al., 2022; Aguilar et al., 2015).

Un segundo conjunto de problemas reside en las limitaciones normativas e institucionales. La carencia de marcos regulatorios robustos y una coordinación débil entre las diferentes instituciones generan vacíos legales. Esta situación obstaculiza significativamente la efectiva implementación de planes integrales para el manejo adecuado de los residuos (Silva Martínez et al., 2024).

En tercer lugar, la escasa participación ciudadana representa un obstáculo importante. Factores relacionados con la cultura y la falta de educación ambiental limitan la colaboración activa de los ciudadanos, lo cual dificulta la separación de residuos en la fuente y compromete el éxito de los programas de reciclaje (Araiza et al., 2017).

Finalmente, las restricciones económicas y técnicas cierran el ciclo de desafíos. Los presupuestos limitados, sumados a la poca disponibilidad de tecnologías adecuadas para el tratamiento, fuerzan a las autoridades a adoptar prácticas deficientes, como es el caso del depósito final de residuos en tiraderos a cielo abierto (Castañeda Delgado & Escatel, 2015).

Como se observa de manera recurrente, como se ilustra en la Fig. 1, una práctica habitual es que la mayor parte de estos residuos orgánicos se mezclan indiscriminadamente con la basura inorgánica y con otros desechos de distintas naturalezas. Esta mezcla no solo contamina el material reciclable, sino que también crea lixiviados y acelera la generación de gases de efecto invernadero (principalmente metano) en los sitios de disposición final.

El problema se agrava debido a la ausencia o la insuficiencia de programas municipales de compostaje o de biodigestión diseñados para la gestión diferenciada de esta fracción. La falta de infraestructura y de políticas públicas efectivas para la separación en origen y el procesamiento biológico limita de manera drástica el aprovechamiento integral de estos materiales. Esto representa una oportunidad perdida, pues el tratamiento de los residuos orgánicos, específicamente a través del compostaje, tiene el potencial de reducir hasta en un 90% la cantidad de desechos orgánicos que terminan siendo enviados a los rellenos sanitarios o tiraderos (Castañeda Delgado & Escatel, 2015).



Fig. 1. Desperdicios orgánicos que son desechados con el resto de la basura, debido a falta de políticas de separación de residuos.

Si bien el compostaje es una práctica efectiva, los métodos tradicionales son poco prácticos en entornos de alta densidad poblacional y espacios reducidos (menos de 60m²). Esta barrera, sumada a los retos de costo, conectividad y capacitación en tecnologías emergentes (González Pedraza et al., 2024), justifica la búsqueda de una solución tecnológica.

El problema central de esta tesis aborda directamente estas limitaciones: ¿Cómo diseñar e implementar un sistema de compostaje automatizado y compacto que reduzca el tiempo de procesamiento de residuos vegetales en entornos domésticos urbanos, superando las limitaciones del método tradicional?

1.2. Justificación

Los estudios analizados demuestran la viabilidad económica y ambiental del compostaje automatizado y descentralizado en contextos urbanos. Patiño-Forero et al. (2023) confirman que los sistemas automatizados con tecnologías 4.0 representan una alternativa sostenible con alto impacto ambiental positivo, optimizando parámetros críticos como aireación, humedad y temperatura.

Tagle-Zamora et al. (2025) evidencian beneficios económicos significativos del compostaje descentralizado en León, México, con reducciones de emisiones de entre 68.74 y 824.91 toneladas de CO₂ anuales y ahorros municipales de 2.8 a 34.4 millones de pesos anuales. Cruz Salinas et al. (2023) demuestran la sustentabilidad económica-financiera de plantas de compostaje en distritos peruanos, donde los residuos orgánicos representan 53.98% del total de desechos. Cartagena-Herrera et al. (2025) reportan 81% de aceptación ciudadana para implementación de compostaje, destacando beneficios como generación de abono (52.4%) y reducción de residuos (33.3%).

El compostaje es una práctica efectiva para minimizar la acumulación de desechos en los vertederos, convirtiendo residuos orgánicos como restos de comida y vegetales en compost, un material rico en nutrientes beneficioso para el suelo. Además de reducir la contaminación ambiental, el compostaje mejora la calidad del suelo al enriquecerlo con nutrientes esenciales, mejorando su estructura y capacidad de retención de agua (Osorio-Hernández, 2022).

Para optimizar este proceso, se propone un compostador automatizado que monitorea condiciones como humedad y temperatura, reduciendo olores y facilitando su uso en los hogares. Con un diseño compacto y un sistema de control intuitivo, este compostador busca promover una gestión eficiente de los residuos vegetales, contribuyendo a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y al combate del cambio climático.

La creciente concentración poblacional en entornos urbanos, caracterizada por la predominancia de viviendas con espacios reducidos, plantea desafíos significativos para la implementación de prácticas sostenibles de gestión de residuos a nivel domiciliario. En este contexto, el desarrollo de sistemas compactos, eficientes y adaptados a espacios limitados adquiere especial relevancia.

La urbanización acelerada ha propiciado un incremento en la generación de residuos domésticos, particularmente orgánicos, que en su mayoría son destinados a disposición final en rellenos sanitarios debido a la carencia de alternativas viables para su tratamiento in situ. Las estadísticas actuales indican que una familia típica urbana (aquella que reside en entornos de alta densidad poblacional y viviendas con espacios reducidos, y con 2 a 4 integrantes en promedio) genera entre 1.5-2.5 kg de residuos orgánicos semanalmente, volumen suficiente para justificar sistemas domésticos de tratamiento que reduzcan la presión sobre los sistemas municipales de gestión de residuos (Chávez et al. 2016).

Los compostadores tradicionales presentan limitaciones significativas para su implementación en entornos urbanos con espacios reducidos, entre ellas:

- Requerimiento de superficies totalmente ventiladas para su instalación y operación.
- Dificultades para el volteo manual en espacios confinados.
- Potencial generación de olores indeseables en proximidad a áreas habitables.
- Tiempos prolongados de proceso que pueden resultar poco prácticos para usuarios urbanos.

El sistema de compostaje automatizado se distingue por su diseño optimizado para espacios urbanos. Su configuración tipo tómbola, con forma de prisma octagonal, asegura un diseño compacto que maximiza el volumen útil. Esta eficiencia espacial lo hace ideal para su instalación en balcones, terrazas pequeñas o interiores ventilados, donde el espacio es limitado.

Una de sus características principales es la automatización para un proceso eficiente. Gracias a un sistema de rotación autónoma, se elimina la necesidad de volteo manual y el espacio adicional que esto requiere. Esta rotación constante y eficiente logra una aireación y homogeneización sin intervención del usuario. Además, la monitorización y rotación automática permiten un control preciso de la humedad y la temperatura, lo que minimiza la generación de olores desagradables y acelera significativamente el proceso de descomposición.

Finalmente, el sistema ofrece una perceptible aceleración del proceso de compostaje. La manipulación automatizada de las condiciones reduce los tiempos de procesamiento en comparación con los métodos tradicionales. Esta característica de compostaje rápido es atractiva para usuarios urbanos que enfrentan limitaciones de almacenamiento prolongado y desean un sistema de gestión de residuos orgánicos más dinámico.

La propuesta representa una respuesta tecnológica a la necesidad de democratizar prácticas de economía circular en contextos urbanos con restricciones espaciales, permitiendo que un mayor segmento de la población participe activamente en la valorización de sus residuos orgánicos. Además, el sistema propuesto contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), ya que el sistema aborda las limitaciones de espacio en entornos urbanos compactos al ofrecer una solución de compostaje automatizado y compacto (tipo tómbola de prisma octagonal) que puede instalarse en balcones o terrazas pequeñas y el ODS 12 (Producción y consumo responsables), mediante la promoción de prácticas de gestión sostenible de residuos a nivel domiciliario en entornos urbanos compactos

(Naciones Unidas, 2018) al promover la revalorización de residuos orgánicos a nivel familiar, convirtiendo desechos orgánicos (como restos de comida y vegetales) en composta. Esta práctica es un ejemplo de economía circular que desvía entre el 80% y 90% de la materia orgánica de los desechos enviados a rellenos sanitarios.

La relevancia del proyecto se magnifica al considerar las tendencias actuales hacia viviendas cada vez más reducidas en entornos urbanos densos, donde soluciones como la propuesta pueden facilitar la transición hacia modelos más sostenibles de gestión de residuos sin comprometer la calidad de vida ni requerir cambios drásticos en los patrones de comportamiento de los usuarios.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Eficientar la gestión de desechos vegetales a través del diseño de un compostador automatizado que manipule los parámetros de humedad y temperatura para producir compost en menor tiempo aplicado a espacios reducidos.

1.3.2. Objetivos Específicos

Objetivos Específicos Detallados:

- Identificar y documentar las condiciones físico-químicas óptimas para una compostación acelerada.
- Diseñar e implementar el bloque de automatización y control del sistema de compostaje:
- Diseñar un compostador automatizado, con la finalidad gestionar de manera eficiente los desechos de origen vegetal en el hogar en menor tiempo.
- Validar y Evaluar el Rendimiento del Compostador Automatizado

1.4. Alcances y Limitaciones

La automatización de un compostador doméstico representa un avance significativo respecto a los métodos manuales tradicionales, no sólo en términos de eficiencia operativa, sino también en el aseguramiento de la consistencia del proceso de tratamiento de residuos orgánicos.

La evidencia documental subraya una serie de beneficios clave de la adopción de sistemas automatizados. Uno de los principales beneficios, lo encontramos en la reducción en el ciclo de compostaje. Los sistemas controlados han demostrado la capacidad de disminuir el tiempo de procesamiento de residuos de un promedio de 70 días a menos de 50 días hasta la fase de enfriamiento, lo que se traduce en una optimización aproximada del 30% en comparación con las técnicas convencionales. Esta aceleración es consecuencia directa del control en tiempo real de variables críticas como la temperatura, la humedad y la aireación mediante las rotaciones programadas en las fases termófila y de enfriamiento, factores determinantes para la velocidad y estabilidad de la descomposición biológica.

Además, la automatización reduce la necesidad de supervisión y manipulación constante, equiparándose a una disminución considerable en los "costos laborales" que, en sistemas a mayor escala, puede ser de hasta un 80%. Para el usuario doméstico, esto se traduce en un dispositivo que demanda una supervisión mínima, lo que facilita la participación en prácticas de economía circular sin requerir tiempo ni conocimientos técnicos avanzados.

Desde una perspectiva técnico-operativa, la automatización mejora la consistencia final del compost. Al mantener las condiciones adecuadas de manera estable y continua, el proceso se independiza de la experiencia o constancia del usuario. La integración de tecnologías basadas en microcontroladores (como Arduino o ESP32) con sensores especializados de humedad y temperatura, permite un monitoreo continuo adecuado para alcanzar mejores características físico-químicas en el producto resultante.

En el aspecto ambiental, los sistemas de compostaje controlados son una alternativa responsable. Su uso puede reducir entre un 15% y un 20% las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), además de minimizar la liberación de gases de efecto invernadero perjudiciales como el metano (CH_4) y el amoníaco (NH_3), asociados al manejo inadecuado de residuos orgánicos (Veizaga Balta et al., 2025). Esto establece al compostador automatizado como una opción al compostaje manual o a la disposición final en rellenos sanitarios.

Aunque la investigación inicial se enfoca a menudo en sistemas municipales o de mayor escala urbana, los beneficios operativos y ambientales documentados son completamente escalables a nivel doméstico. Su adopción contribuye directamente a la reducción del volumen de residuos enviados a los vertederos municipales y fomenta una gestión eficiente e independiente de los residuos orgánicos por parte del usuario, disminuyendo externalidades negativas como la generación de lixiviados.

1.4.1. Limitaciones y desafíos en la implementación

Pese a las ventajas operativas, económicas y ambientales que ofrece, la implementación efectiva y masiva de la automatización en el compostaje doméstico no está exenta de desafíos. En este sentido, la propuesta tecnológica confronta diversas limitaciones cruciales que deben ser rigurosamente abordadas, destacándose las barreras técnicas y de fiabilidad, inherentes a la integración de sistemas de control y la durabilidad de sensores en ambientes hostiles, los significativos costos iniciales que actúan como una barrera de accesibilidad, las lagunas en la evidencia empírica a largo plazo y la dificultad para escalar los prototipos a diversas necesidades familiares o condiciones ambientales, así como los persistentes retos de aceptación social ligados a la percepción de olores e insectos. Finalmente, la falta de estandarización tecnológica entre la rápida diversificación de componentes dificulta la comparación de resultados y la creación de protocolos universales de uso. Entre algunos de estos factores, encontramos que a complejidad reside en la integración robusta de los sistemas de control y sensores. Es fundamental asegurar la durabilidad y la calibración adecuada de los componentes electrónicos en ambientes hostiles, caracterizados por alta humedad y la presencia de gases corrosivos propios del proceso de compostaje. La literatura consultada indica que los sistemas automatizados aún requieren una mayor investigación en cuanto a su desempeño a largo plazo y su fiabilidad sostenida en escenarios de uso doméstico no controlados (Barros Pastor et al., 2023).

En cuanto al factor del costo Inicial y accesibilidad, encontramos que uno de los desafíos más significativos son los costos iniciales de implementación, que son inherentemente superiores a los de un compostador manual simple. Aunque esta inversión puede compensarse con la reducción de la intervención humana y el incremento de la eficiencia a largo plazo, el costo inicial actúa como una barrera para la adopción por parte de usuarios domésticos con recursos limitados. Estudios sistemáticos confirman que, incluso a nivel industrial o municipal, los costos iniciales representan un obstáculo para la masificación de la tecnología.

Limitaciones Metodológicas y de Escalabilidad: La evidencia empírica de largo plazo presenta lagunas, dado que gran parte de los beneficios se reportan en prototipos o estudios piloto de duración limitada, y no en implementaciones prolongadas bajo condiciones de uso real. Esto restringe la capacidad de evaluar con certeza el rendimiento verdadero del sistema automatizado en el hogar. Asimismo, muchos prototipos están diseñados para operar con volúmenes pequeños y controlados, lo que plantea desafíos significativos para su escalabilidad a diferentes necesidades familiares o para su adaptación a condiciones ambientales variables.

En cuanto al factor de aceptación social y percepción de riesgo, la aceptación del compostaje sigue siendo un reto. A pesar de que la automatización simplifica el proceso, persisten percepciones negativas relacionadas con la generación de olores, la posible presencia de insectos y los temores sanitarios, lo cual puede desalentar a los usuarios a integrar el sistema en sus hogares. La adopción exitosa, en gran medida, depende de la percepción de comodidad, limpieza y seguridad que el sistema logre proyectar.

Se detectó también una cierta falta de estandarización tecnológica, debido a la rápida diversificación en tecnologías (sensores, microcontroladores, plataformas de Internet de las Cosas - IoT) y esto ha resultado en una falta de estandarización en los diseños de compostadores automatizados. Esto genera dificultades para comparar resultados de desempeño entre distintos modelos y limita la creación de guías o protocolos universales que aseguren un funcionamiento óptimo para todos los usuarios.

1.5. Aportación

Esta tesis propone y valida una solución tecnológica para la gestión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que supera las limitaciones de espacio y manejo del compostaje doméstico urbano. La evidencia confirma que los sistemas automatizados de compostaje son económicamente viables y eficientes, ofreciendo beneficios municipales como la mitigación de emisiones (68.74-824.91 tCO₂/año) y ahorros (2.8-34.4 millones de pesos/año) (Tagle-Zamora et al., 2025). Además, los sistemas tecnificados han demostrado aumentar la eficiencia operativa, reduciendo el tiempo de procesamiento hasta en un 40% y la dependencia de mano de obra en un 50% (Oviedo et al., 2025), haciendo el proceso más predecible.

Los Sistemas de compostaje automático para el hogar representan una estrategia con alto potencial para fortalecer la gestión sostenible de residuos orgánicos. La evidencia disponible señala que esta tecnología no solo es económicamente viable, sino que también permite generar beneficios ambientales y operativos de considerable relevancia para los gobiernos locales.

En términos económicos, diversos estudios han documentado ahorros importantes derivados de la reducción en los volúmenes de residuos que deben ser recolectados, transportados y dispuestos en rellenos sanitarios. Tagle-Zamora et al. (2025) estiman que los municipios pueden alcanzar ahorros anuales que oscilan entre 2.8 y 34.4 millones de pesos, dependiendo del grado de participación ciudadana en programas de compostaje descentralizado. A ello se suma una disminución significativa

de emisiones, con reducciones reportadas entre 68.74 y 824.91 tCO₂ (toneladas de CO₂) por año, lo que contribuye directamente al cumplimiento de metas climáticas locales.

Los beneficios operativos también han sido documentados en sistemas más tecnificados. Oviedo et al. (2025) señalan que el compostaje mecanizado es particularmente eficiente, al disminuir el tiempo de procesamiento en un 40% y reducir los requerimientos de mano de obra en un 50%, con costos de operación anuales relativamente bajos (aproximadamente \$320,000.00). Estos resultados muestran que la automatización no solo optimiza el proceso, sino que lo vuelve más predecible y menos dependiente de la intervención constante del personal.

Por su parte, Candida et al. (2021) demostraron que algunos modelos de compostadores automáticos pueden transformar residuos orgánicos en un fertilizante utilizable en tan solo 24 horas, lo que representa una mejora sustancial respecto a los métodos tradicionales, cuyos periodos de maduración pueden extenderse durante semanas o meses. Entre los beneficios más relevantes destacan la disminución en los costos de gestión municipal, la reducción en el uso de vertederos y la obtención de un fertilizante orgánico de alta calidad que puede reintegrarse a programas de agricultura urbana o mantenimiento de áreas verdes.

En conjunto, estos estudios respaldan la idea de que los compostadores automatizados constituyen una alternativa sólida para los municipios que buscan modernizar su manejo de residuos orgánicos, reducir su impacto ambiental y avanzar hacia modelos de economía circular. Su implementación no solo se traduce en eficiencias operativas y ahorro económico, sino que también impulsa una transformación positiva en las prácticas locales de sostenibilidad.

1.6. Estructura del Documento

La estructura de este documento de tesis se ha organizado en nueve capítulos con una secuencia lógica, diseñada para guiar al lector desde la contextualización de la problemática hasta la presentación de las conclusiones y el trabajo futuro.

- **Capítulo I: Introducción.** Este capítulo inicial sienta las bases del trabajo al presentar los antecedentes que enmarcan la gestión de residuos orgánicos en entornos urbanos. Seguidamente, define la problemática central que aborda la tesis y la justificación de la investigación, detallando su relevancia social, económica y ambiental. Finalmente, establece

los objetivos (General y Específicos), los alcances y limitaciones del proyecto, y la aportación de la investigación.

- **Capítulo II: Marco Teórico.** Establece los fundamentos conceptuales y científicos de la investigación. Aborda la conceptualización del compostaje, las etapas involucradas en el proceso de descomposición y los parámetros críticos que intervienen en el proceso de compostaje. Se centra en los microorganismos involucrados en el proceso del compostaje y finaliza con el marco de la automatización en la gestión de residuos orgánicos.
- **Capítulo III: Estado del Arte.** Presenta un análisis de las investigaciones y desarrollos existentes en el área, clasificando las referencias clave dentro de sus categorías del estado del arte para situar la contribución de la tesis.
- **Capítulo IV: Metodología de Solución.** Detalla el enfoque tecnológico adoptado. Cubre la selección de variables a controlar, el diseño del compostador automatizado (incluyendo la estructura física y los componentes electrónicos/sensores), y describe el sistema de rotación y aireación, así como el diseño y protocolo de los ciclos de experimentación.
- **Capítulo V: Resultados.** Muestra los hallazgos empíricos obtenidos de la experimentación con el compostador automatizado, incluyendo la evolución temporal de temperatura, el comportamiento de la humedad, la duración temporal por etapas y el tiempo total requerido por ciclo. También presenta la reducción de volumen y la evaluación del producto final, a través de sus características físico-químicas y diversas secciones de comparación con la composta obtenido y con el método tradicional.
- **Capítulo VI: Análisis y Discusión.** Interpreta los datos del capítulo anterior. Se ofrece una Interpretación de resultados, se abordan las limitaciones del estudio y oportunidades de mejora, y se discute la aplicabilidad del sistema en entornos domésticos, desglosando sus ventajas y barreras.
- **Capítulo VII: Conclusiones.** Recopila los principales hallazgos del trabajo y ofrece las recomendaciones para futuras investigaciones que se desprenden de los resultados obtenidos.
- **Capítulo VIII: Referencias.** Se compila la lista completa y ordenada de las fuentes documentales, académicas y tecnológicas (libros, artículos científicos, reportes técnicos, tesis,

sitios web, etc.) que fueron citadas o consultadas a lo largo de la investigación para fundamentar y dar soporte al presente trabajo.

- **Capítulo IX: Anexos.** Contiene la documentación de soporte esencial para la transparencia y validación de la investigación. Este capítulo compila el código fuente del sistema de automatización (Anexo A), los datos crudos de temperatura de los ciclos experimentales (Anexo B), y la evidencia de diseminación de resultados académicos, incluyendo el Póster Publicado (Anexo C) y el Artículo Publicado (Anexo D).

Capítulo II

2. Marco Teórico

2.1. Conceptualización del compostaje

Según Montesinos et al. (2020), el compostaje se puede definir como un proceso biológico de degradación aeróbica controlada de la materia orgánica, ya que implica por una parte la acción de diferentes microorganismos mediante la cual los mismos transforman los residuos, y por otra parte la producción de un producto estabilizado, higiénico y rico en nutrientes, la composta. El compostaje se puede entender como parte de una estrategia de economía circular porque convierte la fracción de residuos en insumos que pueden ser empleados en la agricultura o también la jardinería, todo ello sin dejar de contribuir a disminuir la presión que tienen los sistemas de eliminación de residuos.

Existen diferentes modalidades de compostaje (Vargas-Pineda, 2019):

- **Centralizado:** se desarrolla en plantas de gran escala y su principal ventaja es que tiende a ser más eficiente por economías de escala, con la limitante de una gran inversión.
- **Descentralizado:** se implementa en comunidades o barrios, con sistemas medianos que permiten reducir los costos de transporte. Aún así, los costos iniciales son altos.
- **Domiciliario:** realizado a nivel individual o familiar, generalmente con equipos de pequeña escala. Esta modalidad favorece la participación ciudadana y la reducción de costos de transporte e implementación, pero su limitación es que requiere un mayor compromiso individual.

Como se puede observar, cada modalidad presenta ventajas y limitaciones tanto económicas como operativas. Los sistemas centralizados tienden a ser más eficientes por economías de escala, mientras que los domiciliarios favorecen la participación ciudadana y la reducción de costos de transporte, aunque requieren mayor compromiso individual.

2.2. Etapas involucradas en el proceso de descomposición

En las primeras etapas del compostaje, los hongos mesófilos del filo Ascomycota son los principales responsables de la degradación de compuestos orgánicos. Géneros como *Aspergillus*, *Penicillium* y

Thermomyces son frecuentemente reportados, destacándose especies como *Aspergillus flavus* y *Penicillium* spp.

Estos hongos contribuyen a la descomposición de polisacáridos y otros compuestos fácilmente asimilables, facilitando la actividad bacteriana subsecuente (Melo Silva, 2009).

2.2.1. Fase inicial o mesófila

La fase mesófila del compostaje se caracteriza por temperaturas moderadas, típicamente en el rango de 20 °C a 45 °C. Esta etapa suele tener una duración que puede ir desde los 5 a los 10 días, dependiendo de la composición del material y las condiciones de aireación. Durante este tiempo, existe una clara predominancia de microorganismos mesófilos, tanto bacterias como hongos, que son responsables de la degradación inicial de los compuestos más sencillos. Entre las bacterias, los géneros *Bacillus* y *Paenibacillus* se reportan como dominantes o recurrentes, acompañados por otros géneros como *Pseudomonas* y *Luteimonas* (Gómez y Tibayde, 2009; Zhang, Zeng, Chen, Yu, Yu, Li, Yu y Huang, 2011).

Respecto a los hongos mesofílicos, se identifican géneros como *Aspergillus flavus*, *Penicillium* y *Thermomyces* (Silva et al., 2009). Estos microorganismos participan activamente en la descomposición de azúcares simples, hemicelulosas, carbohidratos, proteínas y compuestos solubles. Esta intensa actividad metabólica es la que genera una liberación significativa de energía, resultando en el consiguiente incremento de la temperatura del sistema, lo que marca la transición a la siguiente etapa del proceso.

2.2.2. Fase termófila

La fase termófila se desarrolla a temperaturas elevadas, en el rango de 45 °C a 75 °C, con una duración que varía, generalmente 1 a 3 semanas, lo que impulsa el crecimiento y la actividad de microorganismos termófilos y termotolerantes. En esta etapa, el filo dominante entre las bacterias es Firmicutes, con el género *Bacillus* manteniendo su representatividad a través de especies como *Bacillus licheniformis* y *Bacillus thermoamylovorans*.

También se reporta una presencia significativa de *Aeribacillus*, *Actinobacteria* y miembros de *Proteobacteria* (López et al., 2021). Estos grupos microbianos son esenciales para la degradación de compuestos estructurales complejos como la celulosa y la hemicelulosa, al producir enzimas

termoestables que les permiten operar eficazmente bajo estas condiciones extremas. De forma paralela, predominan hongos termotolerantes y termófilos, incluyendo a *Aspergillus fumigatus*, *Thermomyces lanuginosus* y *Talaromyces*, cuya función es clave en la transformación de lignocelulosa y lignina, materiales vegetales recalcitrantes, logrando así mantener la estabilidad y velocidad del proceso de descomposición.

2.2.3. Fases de enfriamiento y maduración

Las fases de enfriamiento y maduración, con una duración de 14 a 40 días y 90 a 180 días respectivamente, es la etapa conclusiva del compostaje, en la que la temperatura desciende progresivamente, propiciando la reaparición y el incremento de la diversidad de bacterias mesófilas.

En esta fase importante para la estabilización del material, se observa un aumento significativo en la abundancia de bacterias clave como las Actinobacteria y Streptomyces, géneros que, junto a la persistencia de Bacillus y Aeribacillus, están directamente asociados a los procesos de humificación de la materia orgánica, a la formación de compuestos húmicos y a la reducción de la fitotoxicidad del producto final (Escobar et al., 2012).

Cabe destacar que Bacillus es el único género bacteriano reportado como predominante en todas las etapas del compostaje, lo que subraya su alta adaptabilidad. Paralelamente, la diversidad fúngica también aumenta considerablemente, con la incorporación de miembros de Basidiomycota y Zygomycota, y diversos géneros de Ascomycota (incluyendo Aspergillus terreus y Aspergillus niger) (Escobar et al., 2012).

Estos hongos contribuyen a la estabilización definitiva de la composta y a la degradación residual de compuestos lignificados, resultando en un producto final biológicamente equilibrado. Así, esta etapa final garantiza la descomposición y la estabilización de la materia orgánica como parte de un proceso integral de sucesión microbiana (Akyol, 2019).

La Fig. 2 ilustra el tiempo de duración estimado para cada etapa del proceso de compostaje, un ciclo biológico fundamental para la transformación de materia orgánica en un material estable y rico en nutrientes. Este proceso se divide generalmente en tres fases principales (algunos autores juntan enfriamiento con maduración), cada una con un rango temporal específico que depende de factores como el tipo de material inicial, las condiciones ambientales y el manejo del proceso.

La Fig. 2, por lo tanto, no solo proporciona una cronología, sino que también subraya la naturaleza secuencial y dependiente de estas etapas para lograr la calidad deseada del producto final.

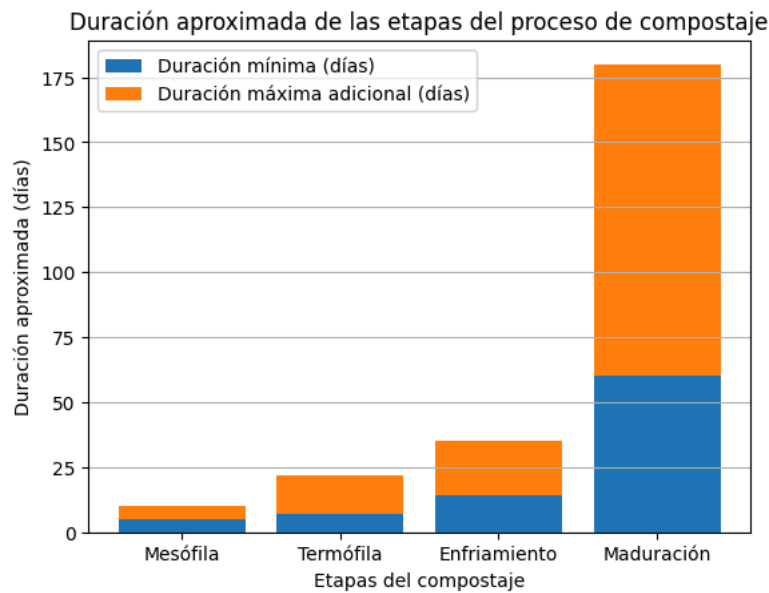


Fig. 2. Duración estimada de cada fase del proceso de compostaje en un ambiente convencional.

2.3. Parámetros críticos que intervienen en el proceso de compostaje

La calidad del compost, entendida como el grado de madurez y tasa de nutrientes que contiene, depende del control de diferentes parámetros operativos y de la composición inicial de los materiales que se utilizan para producirlo. De acuerdo con la literatura revisada, los motivos más importantes son la relación Carbono/Nitrógeno (C/N), el Potencial Hidrógeno (pH), la humedad, la temperatura, la aireación, la inoculación microbiana y la mezcla de materias primas (Silva, 2009; Ji et al., 2023).

Una relación C/N inicial de entre 20:1 y 35:1 (con un óptimo entre 26:1 y 30:1) propicia la estabilización de la materia orgánica y permite llegar a un valor final de C/N inferior a 23, lo que está relacionado con compost maduro (Jiménez y Garcia, 1991; Ji et al., 2023). El pH se debe mantener entre 6.5 y 8.5 para el adecuado funcionamiento de la actividad microbiana en el proceso de compostaje y la adecuada disponibilidad de nutrientes (Peña et al., 2020). Al mismo tiempo, un

contenido de humedad entre el 40% y el 60% promueve la tasa de descomposición y favorece el proceso aeróbico (Albarracín Sánchez et al., 2018).

El control térmico es otro factor importante que se puede considerar: la permanencia en condiciones termofílicas (45–75 °C) durante el proceso de compostaje hace que se reduzcan patógenos y favorece la transición a una pérdida controlada de materia orgánica (Gómez-Brandón et al., 2008). La aireación ya sea mediante volteos o sistemas forzados mejora la tasa de rectificación, y mejora la homogeneidad del producto final (Castro-Hernández et al., 2023).

Las inoculaciones por medio de un consorcio microbiano (Degradabiol o Bacilos) han mostrado un aumento de cationes básicos (calcio, magnesio, potasio) y mejorar, entre otros, índices generales de calidad (Castro-Hernández et al., 2023). Por su parte, la mezcla balanceada de materiales (estiércol animal y residuos vegetales, por ejemplo) influye directamente en el contenido final de nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes (Rivas-Nichorzon y Silva-Acuña, 2020); sin embargo, algunos materiales, como el pergamino del café, disminuyen la tasa de biodegradación, además incrementar las pérdidas de amoníaco, por lo que su uso debe controlarse (Madrid et al., 2000).

La Fig. 3 ilustra la variación de los parámetros críticos de humedad y temperatura a lo largo de las distintas etapas que componen el proceso de compostaje. Esta representación gráfica es esencial para comprender la dinámica biológica del proceso, ya que la humedad y temperatura son factores determinantes para la actividad microbiana. Se observa cómo la temperatura experimenta un ascenso marcado durante la fase inicial, alcanzando picos que son factores clave para la higienización del material (eliminación de patógenos y semillas).

Paralelamente, la gráfica muestra la evolución de la humedad, la cual debe mantenerse dentro de un rango óptimo (típicamente entre 40% y 60%) para asegurar la respiración aeróbica de los microorganismos en las primeras etapas. Las desviaciones fuera de este rango pueden conducir a condiciones anaeróbicas, resultando en olores indeseables y una calidad inferior del compost.

Finalmente, se aprecia el descenso gradual de ambos parámetros (humedad y temperatura) durante la etapa de maduración (hasta 30% y 40% de humedad), indicando la estabilización del material orgánico y la formación del producto final apto para su uso como enmienda de suelo.

Rangos aproximados de humedad y temperatura en el proceso de compostaje

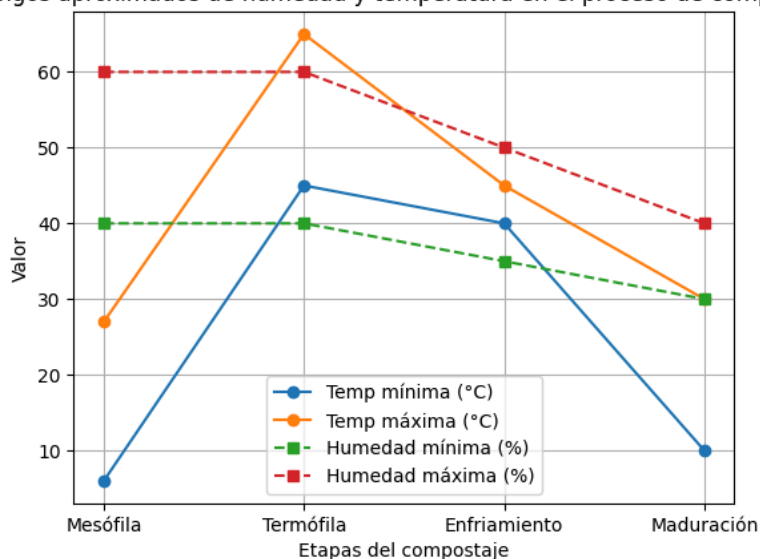


Fig. 3. Rangos mínimos y máximos tanto para humedad y temperatura para cada etapa.

La determinación de la madurez de la composta se realiza mediante determinaciones químicas (C/N, capacidad de intercambio catiónico > 60 meq/100g, pH, conductividad eléctrica < 3 dS/m), biológicas (índice de germinación > 70) y físicas (temperatura, color, olor) (Defrieri et al., 2015; Peña et al., 2020). Como resultado, la composta obtenida no solo es estable y segura (sanitizada), sino que también posee un valor fertilizante adecuado.

2.4. Microorganismos involucrados en el proceso del compostaje

El compostaje de residuos orgánicos agrícolas es un proceso biológico dinámico mediado por una sucesión compleja de comunidades microbianas (Campos Pozuelo y Elías Castells, 2009). La bibliografía revisada sintetiza la evidencia científica disponible sobre los microorganismos bacterianos y fúngicos predominantes durante las distintas etapas del proceso, identificando patrones de sucesión, roles funcionales y factores moduladores como la composición del sustrato.

La revisión sistemática de la literatura revela una sucesión microbiana bien definida a lo largo de las fases mesófila, termófila y de maduración del compostaje.

En la fase inicial o mesófila, predominan bacterias adaptadas a temperaturas moderadas. Los géneros *Bacillus* y *Paenibacillus* son frecuentemente reportados como dominantes (Gómez y Tibayde, 2009; Zhang, Zeng, Chen, Yu, Yu, Li, Yu y Huang, 2011). En paralelo, la comunidad fúngica está dominada por Ascomycota mesófilos, con géneros como *Aspergillus* (especialmente *A. flavus*), *Penicillium* y *Thermomyces* (Hernández-Lara et al., 2022; Kertesz, 2018). Estos microorganismos inician la degradación de compuestos orgánicos sencillos como azúcares y hemicelulosa.

Durante la fase termófila, el incremento de temperatura selecciona a microorganismos termófilos y termotolerantes. El género bacteriano *Bacillus* se mantiene predominante, con especies como *B. licheniformis* y *B. thermoamylovorans*, y se ve acompañado por otros géneros como *Aeribacillus*, *Actinobacteria* y *Proteobacteria* (López et al., 2021; Neher et al., 2013). Entre los hongos, destacan los termotolerantes *Aspergillus fumigatus*, *Thermomyces lanuginosus* y *Talaromyces*, cruciales para la descomposición de lignocelulosa gracias a su producción de enzimas estables al calor (López et al., 2021).

En la fase de enfriamiento y maduración, la comunidad bacteriana se reconfigura con el retorno de mesófilos y un aumento en la abundancia de *Actinobacteria* y *Streptomyces*, géneros asociados a la humificación y estabilización final de la composta (Akyol, 2019; Neher et al., 2013). La diversidad fúngica se amplía notablemente, incluyendo a Ascomycota (como *Aspergillus terreus* y *A. niger*), Basidiomycota y Zygomycota, sin que un solo género predomine de manera consistente (Hernández-Lara et al., 2022; Neher et al., 2013).

La gráfica de la Fig. 4 representa el nivel relativo de actividad microbiana (escala conceptual) de los principales grupos de microorganismos que intervienen en el compostaje, en función de cada etapa del proceso. Es importante aclarar que la escala no representa concentración absoluta, sino predominio relativo, lo cual es utilizado en la literatura académica analizada para estudios cualitativos del proceso biológico.

En la Fig. 4 se presenta una visualización de la diversidad y la predominancia relativa de las comunidades microbianas a lo largo de cada una de las fases o etapas del proceso de compostaje. Específicamente, esta figura ilustra cómo la composición y la actividad de los distintos grupos de microorganismos (tales como bacterias, hongos y actinomicetos) fluctúan significativamente en respuesta a los cambios en las condiciones ambientales del sistema, incluyendo la temperatura, el pH, el contenido de humedad y la disponibilidad de sustrato orgánico. Esta dinámica microbiana es fundamental, ya que son estos microorganismos los principales agentes responsables de la

biodegradación y la humificación de la materia prima, procesos que definen la eficiencia y la calidad de la composta final.

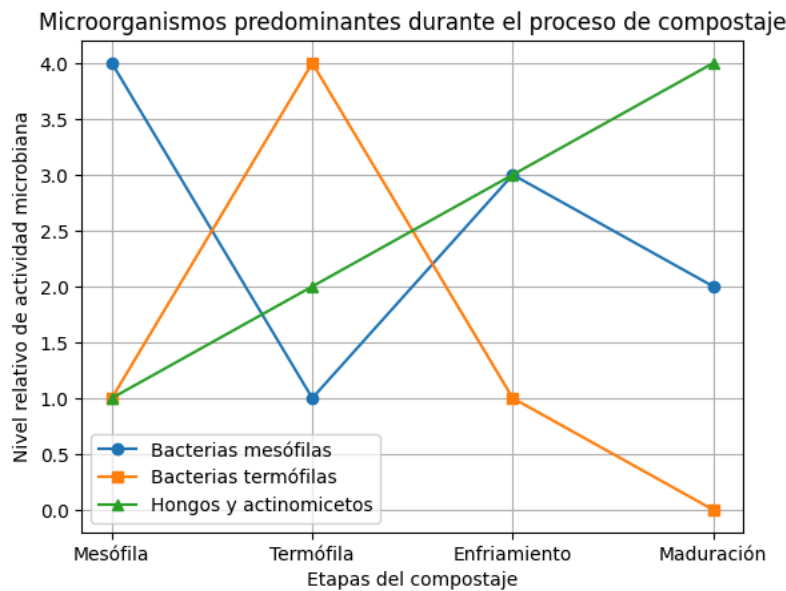


Fig. 4. Nivel relativo de actividad microbiana en cada una de las etapas del proceso de compostaje. Proporciona una representación conceptual del nivel relativo de actividad y la predominancia de los principales consorcios microbianos que median el proceso de compostaje.

Un hallazgo consistente es que *Bacillus* es el único género bacteriano reportado como predominante en las etapas del proceso, subrayando su versatilidad metabólica y adaptabilidad. En contraste, ningún género fúngico mostró predominancia en más de una fase, indicando una sucesión fúngica más específica por etapa.

2.4.1. Influencia del Sustrato y las Condiciones del Proceso

La composición del material de partida es un factor determinante en la estructura inicial y la sucesión de la comunidad microbiana. Sustratos ricos en carbohidratos simples, como residuos azucareros, bagazo o restos de tomate, favorecen el crecimiento rápido de *Bacillus* y *Aspergillus* (Gómez y Tibayde, 2009; Silva, Azevedo, Braga, da Silva, Dias y Schwan, 2009). Por el contrario, la inclusión de materiales lignocelulósicos complejos, como restos de pino o mezclas con madera dura, modula la comunidad, favoreciendo la aparición de filos bacterianos como *Acidobacteria* y *Chloroflexi* (López et al., 2021; Neher et al., 2013).

Las condiciones operativas y las enmiendas también juegan un papel importante. El estudio de Lizaola (2014) reportó que la adición de lombrices (vermicompostaje) incrementó la abundancia de hongos y actinomicetos, así como la actividad enzimática y la formación de ácidos húmicos. Akyol et al. (2019) observaron que, a pesar de usar digestatos de cultivos diferentes, los géneros microbianos dominantes eran similares, sugiriendo que las condiciones del proceso (temperatura, aireación) pueden tener un peso mayor que el sustrato en la selección de un núcleo comunitario central.

La evidencia analizada demuestra que el compostaje de residuos agrícolas es un ecosistema microbiano en sucesión, guiado por la temperatura y la disponibilidad de sustratos. *Bacillus* emerge como un actor bacteriano clave y persistente, mientras que la comunidad fúngica presenta una sucesión más marcada entre etapas (Agnolucci et al., 2013). La composición del residuo inicial define en gran medida el conjunto microbiano pionero, pero las condiciones operativas (aireación, temperatura, enmiendas) son fundamentales para dirigir la sucesión hacia un compost estable. Este conocimiento es esencial para optimizar los procesos de compostaje, mejorar la eficiencia de degradación y potenciar las propiedades beneficiosas de la composta final.

2.4.2. Factores que influyen en la actividad microbiana

Una producción de composta eficiente requiere una mezcla equilibrada de materiales ricos en carbono y nitrógeno, con una relación C/N aproximada de 25–30:1, humedad del 50–60 %, aireación adecuada mediante volteo periódico y el mantenimiento de temperaturas entre 35 °C y 55 °C, lo que permite la actividad de consorcios microbianos termófilos y la higienización del material orgánico (Tortosa et al., 2017). Por su parte, Valente et al. (2016) señalan que desequilibrios en estos parámetros pueden inhibir el desarrollo microbiano y prolongar el tiempo de estabilización del compost.

Asimismo, el monitoreo de parámetros químicos y microbiológicos permite evaluar la madurez y calidad del compost. Defrieri et al. (2015) destacan que variables como el pH, la conductividad eléctrica y la población microbiana son herramientas fundamentales para el control del proceso, especialmente en sistemas tecnificados o automatizados.

La literatura revisada resalta la necesidad de un control sistemático de las condiciones del compostaje para optimizar la actividad microbiana (aireación, humedad, temperatura, pH y relación C/N). La incorporación de sensores y sistemas de monitoreo facilita la toma de decisiones y permite mantener

condiciones óptimas para el desarrollo de los microorganismos (Nemet et al., 2019). Este enfoque resulta particularmente relevante en el contexto de compostadores automatizados de uso doméstico, donde el control preciso de variables es clave para garantizar un proceso eficiente y seguro.

El análisis documental evidencia que el compostaje es un proceso biológicamente activo, dependiente de la interacción entre microorganismos y condiciones ambientales. La correcta gestión de los factores que influyen en la actividad microbiana mejora la eficiencia del proceso y la calidad de la composta obtenida. Los estudios revisados aportan bases científicas sólidas para el diseño y automatización de sistemas de compostaje, especialmente aquellos orientados al uso doméstico y sostenible.

2.4.3. Sucesión microbiana durante el compostaje

Es fundamental comprender los cambios en la composición y diversidad de las comunidades microbianas para optimizar el proceso de compostaje de residuos orgánicos agrícolas. El análisis de la documentación disponible revela estudios que buscan dilucidar los patrones de sucesión microbiana y los factores ambientales que influyen en ellos a lo largo de las diferentes fases del proceso.

La revisión revela una sucesión filogenética predecible en la comunidad bacteriana, fuertemente ligada a las fases del compostaje.

En las etapas iniciales, predominan los filos Firmicutes y Bacteroidetes, grupos copiotrofos especializados en la degradación inicial de materia orgánica lábil (Tiquia, 2005; Zhang, Zeng, Chen, Yu, Yu, Li, Yu y Huang, 2011).

Durante la fase termófila, Firmicutes mantiene su dominio, alcanzando entre el 79.31% y 95.09% de abundancia relativa en compostajes de estiércol (Zhao et al., 2022). Se observa un incremento paralelo de Actinobacteria, que puede pasar del 2.98% al 19.70% (Xie et al., 2021). Los géneros característicos de esta fase son *Bacillus*, *Oceanobacillus* y *Pseudogracilibacillus*, junto con bacterias termófilas estrictas como *Thermobispora* y *Thermobacillus* (López et al., 2021; Tortosa et al., 2017).

En la fase de maduración, la composición sufre un nuevo cambio, con un aumento en la abundancia de Proteobacteria y una consolidación de Actinobacteria, llegando a ser este último el filo dominante en compost de estiércol de oveja maduro (Zhao et al., 2022). También aumentan filos oligotróficos

como Chloroflexi. A nivel de género, destaca Nocardiosis, que puede alcanzar el 26.65% de abundancia relativa (Zhao et al., 2022).

Las comunidades fúngicas muestran una sucesión diferenciada. Los filos dominantes son Ascomycota y Basidiomycota, con géneros como Aspergillus y Penicillium siendo importantes en la fase termófila (Cao et al., 2019). El género Byssochlamys domina durante las transiciones de temperatura, mientras que en la maduración aumenta la abundancia de grupos como norank_c_Sordariomycetes (Grenier et al., 2023).

Un hallazgo importante es la relación inversa en la diversidad de bacterias y hongos durante la fase termófila: mientras la diversidad bacteriana aumenta, la diversidad fúngica disminuye (Tiquia, 2005). La información referente a la sucesión de las comunidades microbianas bacterianas y fúngicas a lo largo de las distintas etapas del proceso de compostaje se sintetiza a continuación en formato tabular. Este análisis expone las variaciones en la composición filogenética y la dinámica poblacional que son críticas para la degradación de la materia orgánica y la higienización del material.

Etapas del Compostaje	Microorganismos Bacterianos Predominantes (Filo/Género)	Microorganismos Fúngicos Predominantes (Filo/Género)	Observaciones y Roles Clave
Inicial (Mesófila)	Filos: <i>Firmicutes</i> y <i>Bacteroidetes</i> .	Filos: Principalmente <i>Ascomycota</i> y <i>Basidiomycota</i> . (Tiquia, 2005; Zhang, Zeng, Chen, Yu, Yu, Li, Yu y Huang, 2011).	Corresponden a grupos copiotrofos que se especializan en la degradación de la materia orgánica lábil, iniciando el proceso de descomposición.

Termófila	Filos: <i>Firmicutes</i> (dominante: 79.31%–95.09% de abundancia relativa en estiércol). Aumento paralelo de <i>Actinobacteria</i> (2.98%–19.70%). Géneros: <i>Bacillus</i> , <i>Oceanobacillus</i> , <i>Pseudogracilibacillus</i> , <i>Thermobispora</i> y <i>Thermobacillus</i> . (Zhao et al., 2022)	Filos: <i>Ascomycota</i> y <i>Basidiomycota</i> . Géneros: <i>Aspergillus</i> y <i>Penicillium</i> (importantes en la fase). <i>Byssochlamys</i> domina durante las transiciones de temperatura. (López et al., 2021; Tortosa et al., 2017)	La diversidad bacteriana experimenta un incremento, en contraste con la diversidad fúngica, que manifiesta una disminución en esta fase. La actividad se centra en la degradación de polímeros complejos como la lignocelulosa.
Maduración	Filos: Aumento de <i>Proteobacteria</i> . <i>Actinobacteria</i> se consolida, llegando a ser el filo dominante en compost de oveja. Incremento de filos oligotróficos, como <i>Chloroflexi</i> . Género: <i>Nocardiopsis</i> (hasta 26.65% de abundancia relativa).	Aumento de abundancia de grupos como <i>norank_c_Sordariomycetes</i> . (Zhao et al., 2022)	Se establece una nueva composición microbiana que se asocia a la humificación y la estabilización final de la composta, con un predominio de microorganismos oligotróficos.

2.4.4. Dinámica de la Diversidad Alfa y Beta

La diversidad alfa (riqueza y uniformidad dentro de una muestra) muestra una trayectoria característica. Múltiples estudios reportan una disminución significativa durante la fase termófila, seguida de una recuperación durante la maduración (Zhao et al., 2022; Zhong et al., 2020). Por ejemplo, en compostaje de paja de trigo, los índices de Shannon y Simpson (también conocidos como índice Shannon-Wiener son medidas de diversidad de especies ampliamente usadas en ecología para cuantificar la riqueza y la equitatividad de una comunidad biológica) fueron significativamente más bajos en la etapa termófila ($P < 0.05$) (Cao et al., 2019). Dichos índices se representan con la

fórmula $H'_f = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$ Donde S es el número total de especies, p_i es la proporción de individuos pertenecientes a la especie i , n_i representa la abundancia de la especie i .

Sin embargo, la uniformidad de la comunidad tiende a aumentar hacia el final del proceso, indicando una distribución más balanceada de las especies que persisten (He et al., 2013).

La diversidad beta (diferencias entre comunidades de diferentes muestras) confirma que las etapas de compostaje albergan consorcios microbianos distintivos. Análisis de Componentes Principales (PCA) y Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS) separan consistentemente las comunidades bacterianas por fase (Chandra et al., 2013).

Un estudio de 24 meses sobre el compostaje (Grenier et al., 2023) demostró una naturaleza dinámica de la microbiota, con una variación significativa en la composición de la comunidad en cada punto temporal. La diversidad microbiana aumentó con el tiempo. El análisis multivariado identificó cinco fases (materia prima inicial, fase joven de 1.5 meses, media de 3 meses, envejecida de 12 meses y maduro de 24 meses), asociando los cambios en la comunidad con la materia orgánica/pared celular de la planta inicialmente, y luego con la temperatura y el pH. El análisis de abundancia diferencial reveló la sucesión de especies, destacando la presencia de degradadoras de carbohidratos/lignina (*Firmicute* y *Actinobacteria*) al inicio, y una alta y constante diversidad de especies con capacidad de amonificación y desnitrificación durante todo el proceso.

2.4.5. Factores Ambientales Conductores de la Sucesión

Los cambios en la comunidad microbiana están impulsados por una jerarquía de factores ambientales que varía según la fase:

- **Temperatura:** Es el principal factor de selección durante la fase termófila, explicando hasta el 56% de la variación en la comunidad fúngica y siendo altamente influyente en la bacteriana. Favorece a los termófilos (*Firmicutes*, *Actinobacteria*) y actúa como un cuello de botella que reduce la diversidad general (Cai et al., 2020; Zhao et al., 2022).
- **pH:** Su importancia aumenta en las fases de enfriamiento (pH 7.0–8.5) y maduración (pH 6.0–8.0), llegando a ser un factor de impacto en la composición de la comunidad (Cai et al., 2020). La diversidad microbiana suele correlacionarse positivamente con el pH de la composta (He et al., 2013).

- **Relación Carbono-Nitrógeno (C:N) y Carbono Orgánico Soluble en Agua (COSA):** La relación C:N inicial y su evolución afectan la disponibilidad de nutrientes. Un C:N alto con alta humedad puede disminuir la riqueza microbiana inicial (Chandra et al., 2013). El COSA es un sustrato clave que influye en la estructura comunitaria, particularmente en fases tempranas (Xie et al., 2021; Zhao et al., 2022).
- **Contenido de Humedad:** Aunque a menudo se controla ($\approx 60\%$), su disminución en la fase termófila puede limitar la actividad microbiana. Es un factor significativo, especialmente para las comunidades fúngicas ($P < 0.05$) (Zhao et al., 2022).

La Fig. 5 presenta de manera aproximada la dinámica del pH a lo largo de las distintas fases que componen el proceso de compostaje. Se destaca en esta representación gráfica no solo la tendencia general del pH, sino también los valores extremos (máximos y mínimos) registrados para cada una de las etapas secuenciales del proceso. El análisis de esta figura nos muestra que es un indicador clave de la actividad microbiana y de la eficiencia del proceso de degradación de la materia orgánica. Por ejemplo, se observa cómo en la fase inicial, que suele ser predominantemente ácida (valores mínimos), se favorece la hidrólisis; mientras que en la fase termófila, es común un incremento hacia valores alcalinos (valores máximos), lo que indica una intensa mineralización y producción de amonio.

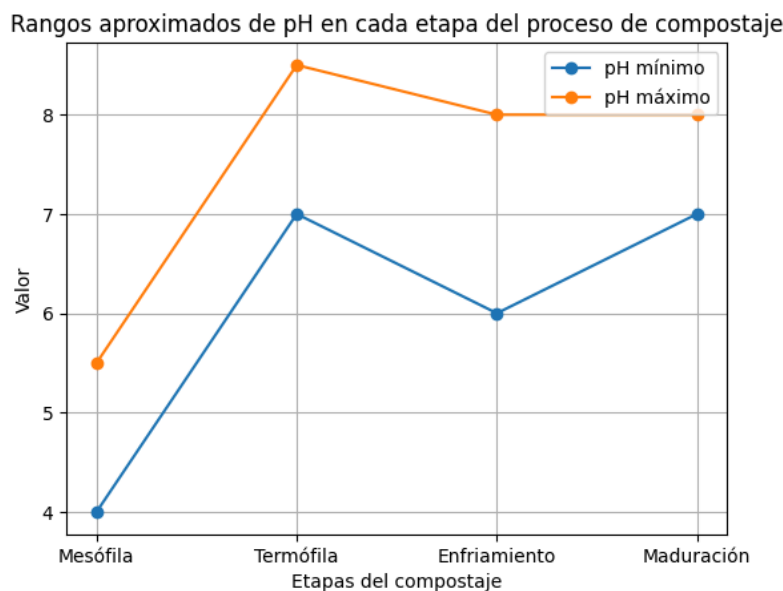


Fig. 5. Rangos aproximados de pH en cada etapa del proceso de compostaje.

2.4.6. Cambios Funcionales y Metabólicos

El proceso de compostaje y vermicompostaje se sostiene sobre una intensa y dinámica actividad bioquímica, caracterizada por una alta especialización de la comunidad microbiana. La actividad enzimática funciona como un indicador clave del progreso del proceso; por ejemplo, la proteasa muestra su máxima actividad en las fases iniciales de descomposición, mientras que la ureasa alcanza su pico durante la fase termófila (He et al., 2013). Específicamente en el vermicompostaje, enzimas como la glucosidasa han sido propuestas como bioindicadores del estado de madurez (Castillo Díaz, 2016).

A nivel metabólico, el análisis metagenómico revela un incremento predicho en el metabolismo de aminoácidos, lípidos, energía y xenobióticos a lo largo del compostaje (Zhao et al., 2022), siendo las vías principales el metabolismo de carbohidratos y aminoácidos. Una estrategia para la persistencia microbiana es la dormancia: la abundancia de genes ligados a la esporulación se incrementa durante la fase termófila y de maduración. Esta capacidad de latencia se correlaciona positivamente con la diversidad beta bacteriana, asegurando la persistencia y la posterior recuperación de la diversidad microbiana tras condiciones de estrés térmico (Xie et al., 2021).

Finalmente, el proceso implica una sucesión temporal de grupos microbianos con roles especializados. Se observa que los degradadores de lignocelulosa (ej. *Thermobifida*, *Streptomyces*) se vuelven dominantes en la fase de maduración. De igual forma, los Arqueos Oxidantes de Amonio (AOA) juegan un papel en los procesos de nitrificación durante las fases posteriores del compostaje (Federici et al., 2011; Zhong et al., 2020).

2.4.7. Conceptualización del compostaje desde la microbiología

Desde una perspectiva microbiológica, el compostaje constituye un proceso dinámico gobernado por la sucesión estructurada de comunidades microbianas que transforman la materia orgánica en un producto estable, sanitizado y rico en sustancias húmicas (compuestos orgánicos complejos de color negro o café oscuro, con elevado peso molecular, propiedades coloidales e hidrofílicas, que constituyen una fracción importante del humus, la materia orgánica principal del suelo, así como de la turba, el carbón y otras fuentes naturales (Bustamante Sánchez, 2014)). En el contexto de la automatización de un compostador de uso doméstico, la comprensión de estos procesos microbiológicos resulta fundamental para el diseño, control y optimización del sistema. El proceso se desarrolla a través de cuatro fases principales (mesófila, termofílica, enfriamiento y maduración), cada una caracterizada por rangos específicos de temperatura, actividad metabólica y dominancia

microbiana. Las bacterias representan entre el 80 y 90 % de la biomasa microbiana, destacando los filos Proteobacteria, Firmicutes, Actinobacteria y Bacteroidetes, mientras que los hongos del filo Ascomycota desempeñan un papel clave en la degradación de compuestos lignocelulósicos.

La eficiencia del compostaje está directamente influenciada por variables físicas y operacionales controlables mediante sistemas automatizados, tales como temperatura, humedad, aireación, pH, relación carbono/nitrógeno y frecuencia de volteo (Avendaño Barrera et al., 2024). Estos factores actúan como mecanismos de regulación ambiental que determinan la diversidad, abundancia y actividad de los microorganismos responsables de la degradación enzimática de la materia orgánica, a través de los ciclos del carbono, nitrógeno, fósforo y azufre. La automatización permite mantener condiciones óptimas y estables, favoreciendo la actividad de la microbiota residente y la expresión de enzimas clave como celulasas, proteasas, fosfatasa y deshidrogenasas (Avendaño Barrera et al., 2024).

Asimismo, la evidencia indica que la inoculación microbiana, aplicada de forma controlada y dependiente del sustrato, puede extender la fase termofílica, mejorar la sanitización y acelerar la mineralización, aspectos relevantes para sistemas domésticos de pequeña escala. El monitoreo automatizado, basado en parámetros microbiológicos, bioquímicos y fisicoquímicos, se consolida como una herramienta esencial para evaluar la estabilidad y madurez de la composta (Avendaño Barrera et al., 2024). En conjunto, la integración del conocimiento microbiológico con tecnologías de automatización permite optimizar el desempeño del compostador doméstico, garantizando un proceso eficiente, seguro y ambientalmente sostenible.

2.4.8. Factores que determinan la dinámica microbiana

Las estrategias de dinámica microbiana constituyen un componente clave para la optimización de sistemas de compostaje automatizados de uso doméstico, al influir directamente en la eficiencia del proceso y la calidad del producto final. Diversos estudios han demostrado que la inoculación con microorganismos específicos o consorcios microbianos modifica la estructura y funcionalidad de las comunidades microbianas durante el compostaje, incrementando la diversidad funcional y estimulando la actividad metabólica de la microbiota, más que sustituirla directamente (Jurado et al., 2015; Liu et al., 2020). Este efecto catalítico se refleja en incrementos de temperatura de entre 3 °C y 7 °C, una prolongación de la fase termófila y una aceleración significativa en la degradación de compuestos recalcitrantes como celulosa, hemicelulosa y lignina, con mejoras reportadas del 21 al 28% respecto a sistemas no inoculados (Li et al., 2024; Jurado et al., 2015).

En el contexto de un compostador doméstico automatizado, el control de variables operativas como temperatura, humedad, aireación y volteo favorece la expresión de los beneficios asociados a la inoculación, al mantener condiciones para el desarrollo de grupos funcionales clave, incluyendo bacterias celulolíticas, microorganismos involucrados en el ciclo del nitrógeno y hongos ligninolíticos (Li et al., 2019; He et al., 2013). Como consecuencia, se observa una disminución más rápida de la relación carbono/nitrógeno, una mayor formación de sustancias húmicas (con incrementos de hasta 26% en ácidos húmicos) y una mejora en la retención de nutrientes como nitrógeno y fósforo, lo que se traduce en un compost más estable y de mayor valor agronómico (Li et al., 2024; Gao et al., 2021).

No obstante, la inoculación microbiana también implica consideraciones ambientales relevantes, ya que, si bien se ha reportado una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como metano y óxido nitroso, también se ha observado un incremento en emisiones odoríferas como amoníaco y sulfuro de hidrógeno, particularmente en sustratos ricos en nitrógeno (Gao et al., 2021; Xi et al., 2005). Estos resultados subrayan la necesidad de integrar la inoculación microbiana con sistemas de monitoreo automatizado que permitan un control dinámico del proceso. En conjunto, la evidencia científica respalda que la combinación de estrategias de inoculación con tecnologías de automatización mejora de manera significativa la eficiencia, estabilidad y seguridad del compostaje doméstico, aunque persisten vacíos de conocimiento relacionados con la dosificación óptima, el momento de aplicación y la validación a mayor escala (Jurado et al., 2015; Ribeiro et al., 2017).

2.5. Automatización en la gestión de residuos orgánicos

La gestión eficiente de residuos orgánicos en entornos urbanos constituye un desafío crítico para la sostenibilidad de las ciudades. En este contexto, la automatización de los procesos de compostaje emerge como una solución tecnológica prometedora para optimizar la eficiencia del tratamiento. La evidencia sintetizada a partir de estudios experimentales, piloto y revisiones sistemáticas indica que la implementación de sistemas automatizados genera mejoras sustanciales y multifacéticas en el procesamiento de residuos orgánicos urbanos (Veizaga Balta et al., 2025).

La mejora más destacada se observa en la reducción del tiempo total del ciclo de compostaje. Estudios reportan disminuciones significativas, pasando de los 90-210 días requeridos por métodos tradicionales a periodos de entre 40 y 60 días en sistemas automatizados. En aplicaciones piloto con intervenciones intensivas, como la aireación forzada y el uso de aceleradores microbianos, se han documentado mejoras de hasta el 600% (García Dávila et al., 2024; Patiño-Forero et al., 2023). Esta

aceleración se atribuye principalmente al monitoreo continuo y al ajuste en tiempo real de variables críticas como la temperatura y la humedad, lo que mantiene condiciones óptimas para la actividad microbiana y acelera la degradación biológica (Janice Rodrigues da Silva, 2019).

Paralelamente, la automatización incrementa notablemente la eficiencia en el uso de recursos, particularmente la mano de obra. La implementación de sistemas de riego y control ambiental automático puede reducir las intervenciones manuales hasta en un 80% (Veizaga Balta et al., 2025). Además, estos sistemas optimizan el consumo energético y permiten un control remoto, eliminando la necesidad de operadores locales permanentes y facilitando la gestión descentralizada (Sánchez Gómez et al., 2023; Patiño-Forero et al., 2023).

Un beneficio ambiental significativo es la reducción de emisiones gaseosas contaminantes. Un estudio comparativo demostró que los sistemas automatizados, especialmente cuando se combinan con microorganismos beneficiosos, pueden reducir las emisiones de metano en un 93.09%, de amoníaco en un 35.17% y de dióxido de carbono en un 13.63% (Reyes-Ordoñez et al., 2020). Este logro es posible gracias a la monitorización continua con sensores electroquímicos y al control activo que previene la formación de condiciones anaeróbicas propicias para la generación de metano.

En cuanto a la calidad del producto final, la composta generada en sistemas automatizados consistentemente cumple o supera los estándares establecidos. Se reportan relaciones Carbono/Nitrógeno (C/N) óptimas (entre 25:1 y 30:1 durante el proceso y valores finales alrededor de 6.5:1), bajas concentraciones de metales pesados por debajo de los umbrales regulatorios, y una efectiva reducción de patógenos (García Dávila et al., 2024; Giraldo Murcia, et al., 2021). Las propiedades agronómicas del compost, como la capacidad de retención de agua y el suministro balanceado de nutrientes, también se ven mejoradas (Veizaga Balta et al., 2025).

Los mecanismos técnicos que habilitan estas ganancias incluyen el uso de microcontroladores (Arduino, Raspberry Pi, ESP32) y plataformas IoT que permiten la adquisición de datos en alta resolución y la ejecución de algoritmos de control. Los sensores miden parámetros clave cada hora, proporcionando una visión detallada de la dinámica del proceso que es inalcanzable con el muestreo manual (González Pedraza et al., 2024). Esto permite la detección temprana de desviaciones y la implementación de acciones correctivas inmediatas, estabilizando el proceso.

No obstante, el desempeño y la viabilidad de estos sistemas son dependientes del contexto. La magnitud de las mejoras varía según la escala (doméstica, comunitaria, industrial), el tipo de residuo procesado y el nivel de integración tecnológica (Veizaga Balta et al., 2025). Los costos iniciales y las

necesidades de mantenimiento y conectividad se identifican como barreras importantes para su adopción masiva, especialmente en entornos comunitarios y de recursos limitados (González Pedraza et al., 2024). Asimismo, persisten vacíos de conocimiento, como la evaluación del desempeño a largo plazo, la integración óptima de múltiples sensores (ej., pH, conductividad eléctrica) y los estudios de transferibilidad entre diferentes contextos urbanos y normativos.

En general, la bibliografía consultada revela que la automatización del compostaje representa una herramienta para aumentar la eficiencia del procesamiento de residuos orgánicos urbanos. Sus beneficios abarcan desde la reducción de tiempos y mano de obra hasta la minimización del impacto ambiental. La investigación futura debe abordar los desafíos de costo, robustez a largo plazo y adaptabilidad social para permitir una implementación escalable y equitativa que contribuya a la transición hacia ciudades más circulares y sostenibles.

Existen algunos dispositivos con fines similares en el mercado, como el GEME Bio - Compostador, que tiene una capacidad de 19L y un costo de \$30,387.34. Este dispositivo no usa botones y genera composta en un lapso de 6 a 8 horas, produciendo hasta 5kg diarios. Utiliza un método de biocompostaje (degradación microbiana, sin molienda, sin deshidratación a alta temperatura y sin ruido), no usa filtros y tiene un sistema de autocontrol de temperatura, además de utilizar un acelerador (Geme-Kobold). Otra opción es el PÜREE, que genera compost en 6 a 7 horas, cuenta con botón de lavado automático y trabaja mediante pirólisis, aunque no se detallan su tamaño ni materiales. Finalmente, el KEEPEEZ consume 500W, tiene un contenedor principal de 4L de aluminio, utiliza secado a alta temperatura, usa filtros de carbón activado y cuenta con aspas para la molienda de residuos sólidos.

La Fig. 6 ofrece una visión detallada de tres prototipos de compostadores domésticos automatizados que actualmente se encuentran accesibles en el mercado. Estos dispositivos representan soluciones innovadoras para la gestión de residuos orgánicos en el hogar, trascendiendo el método tradicional de compostaje manual. Cada uno de estos modelos ha sido diseñado para simplificar el proceso, acelerar la descomposición de los materiales y minimizar los inconvenientes comunes asociados al compostaje, tales como los malos olores o la atracción de plagas. La inclusión de la automatización (que puede abarcar desde el control de la temperatura y la humedad hasta la aireación y el volteo mecánico) asegura la optimización de las condiciones para la actividad microbiana, resultando en compost en un periodo de tiempo significativamente reducido en comparación con los métodos pasivos.



Modelo: GEME Bio - Compostador. Fuente: <https://www.geme.bio/>



Modelo: PÜREE Fuente: <https://www.amazon.com.mx/%C3%9CREE-M%C3%A1quina-de-composta-el%C3%A9ctrica/dp/B0CBNQRKC5>



Modelo: KeepeeZ Fuente: <https://av.maxversus.com/list/electric-composter-1-gallon-large-st/>

Fig. 6. Algunos modelos de compostadores automatizados disponibles en el mercado.

Capítulo III

3. Estado del Arte

3.1. Relación entre microbiología y automatización del compostaje

La bibliografía analizada presenta una revisión sistemática de estudios científicos centrados en la relación entre la microbiológica y la automatización de los sistemas de compostaje, destacando cómo ambos componentes interactúan de manera bidireccional para optimizar la degradación de residuos orgánicos, la reducción de patógenos y el control de emisiones gaseosas. La evidencia recopilada demuestra que la automatización no solo regula variables fisicoquímicas, sino que también utiliza indicadores microbiológicos como señales clave para la toma de decisiones en tiempo real, consolidando un enfoque integrado entre biología y tecnología (Puyuelo, 2012; Pérez, 2011).

La revisión incluyó estudios a distintas escalas (laboratorio, piloto e industrial), siendo los sistemas piloto los más frecuentes. Los tipos de sistemas evaluados abarcan reactores verticales, pilas estáticas y volteadas, túneles de fermentación y prototipos automatizados, con duraciones de compostaje que varían desde 6 días hasta más de 150 días. Un hallazgo relevante es que la automatización permitió reducir los tiempos de compostaje entre 50 % y 67 %, especialmente en

sistemas cerrados con aireación forzada y control térmico preciso (Mena Gil, 2008; Veizaga Balta et al., 2025).

Desde el punto de vista microbiológico, los estudios emplearon una amplia variedad de métodos de monitoreo, entre los que destacan las técnicas respirométricas (métodos de análisis cuantitativo que se basan en la medición e interpretación de la velocidad con la que los microorganismos consumen oxígeno durante procesos biológicos de degradación de sustratos orgánicos o eliminación de nitrógeno bajo condiciones experimentales bien definidas (Contreras, 2007)), particularmente la tasa de consumo de oxígeno (OUR) y la tasa específica de consumo de oxígeno (SOUR), consideradas indicadores directos de la actividad metabólica microbiana. Estos métodos demostraron ser más precisos que los enfoques tradicionales basados únicamente en temperatura o tiempo de residencia, ya que reflejan de forma inmediata la intensidad de la degradación biológica (Scoton y Battistelle, 2013).

El control automatizado basado en OUR sobresale como uno de los avances más significativos, dado que ajusta la aireación en función de la demanda real de oxígeno de los microorganismos. Este enfoque superó a los sistemas de control por puntos de consigna fijos, al reducir el consumo energético, mejorar la estabilidad de la composta y minimizar emisiones indeseables (Fernandes et al., 2000; Pérez, 2011).

En relación con la higienización del compost, los sistemas automatizados mostraron una eficacia en la reducción de microorganismos patógenos. Los resultados indican reducciones del 99.99 % de coliformes fecales y entre 98 % y 100 % de huevos de helmintos, siempre que se mantuvieran condiciones termofílicas sostenidas ($>55^{\circ}\text{C}$) (Mena Gil, 2008; Sá et al., 2014; Miguel et al., 2022). No obstante, el documento señala que la inactivación microbiana depende no solo de la temperatura máxima alcanzada, sino también del tiempo de exposición y del tipo de patógeno, evidenciando resistencias diferenciales entre especies bacterianas.

Otro aspecto relevante abordado es el monitoreo de gases como indicadores indirectos de la actividad microbiana. La medición continua de CO_2 , metano y amoníaco permitió evaluar la eficiencia del proceso y su impacto ambiental. Algunos estudios reportaron reducciones de hasta 93 % en emisiones de metano mediante el uso combinado de automatización y microorganismos beneficiosos, aunque persisten desafíos relacionados con emisiones elevadas de amoníaco, incluso bajo relaciones C/N aparentemente óptimas (Reyes-Ordoñez et al., 2020).

En cuanto a las tecnologías de automatización, se identificó el uso de microcontroladores (Arduino, Raspberry Pi, PLC), sensores de temperatura, humedad, gases y oxígeno, así como plataformas IoT para monitoreo remoto. La frecuencia de adquisición de datos alcanzó resoluciones muy altas (hasta 1440 datos por día), lo que permitió un control fino del proceso y una reducción significativa de la intervención humana, reportándose hasta un 80 % menos de intervención manual en algunos sistemas (Veizaga Balta et al., 2025).

La síntesis de los estudios revela que los beneficios de la automatización son dependientes del contexto. A escala industrial, los túneles cerrados con aireación forzada y control respirométrico mostraron el mejor desempeño global, mientras que en sistemas domésticos o de pequeña escala, soluciones más simples basadas en sensores de humedad y temperatura resultaron suficientes para mejorar la eficiencia del compostaje. Sin embargo, la investigación subraya que aún existen limitaciones importantes, como la escasa integración de sensores de pH y conductividad eléctrica, la heterogeneidad térmica dentro de las pilas y la falta de estudios de largo plazo en sistemas completamente automatizados (Wilson Veizaga Balta et al., 2025)

3.2. Estudios sobre Automatización Aplicada a Procesos de Residuos

Esta categoría de investigación engloba algunos de los estudios y proyectos que se enfocan en la aplicación directa de tecnologías avanzadas y sistemas automatizados en los distintos procesos que componen la gestión integral de residuos sólidos urbanos o industriales. Al centrarse en la implementación práctica y los resultados operativos de estas herramientas (como la robótica, los sensores inteligentes (IoT) y los sistemas de monitoreo y control automatizado), esta línea de estudio ofrece la evidencia empírica más sólida y tangible para abordar y responder de manera directa a la pregunta central de la investigación sobre la eficiencia, sostenibilidad y viabilidad de la automatización en el sector de residuos. Los hallazgos derivados de esta categoría son cruciales para el diseño de políticas públicas, la toma de decisiones empresariales y el desarrollo de futuras innovaciones tecnológicas en el ámbito del saneamiento ambiental.

Gómez Peñafiel & Estrella Quispe, (2025) revelan el proceso de la automatización de un biodigestor para procesar desechos orgánicos. Los hallazgos son significativos: el sistema automatizado redujo en un 40% la necesidad de supervisión manual y mejoró la eficiencia general del proceso en un 15%. Los autores concluyen que esta optimización no solo promueve prácticas sostenibles y la economía circular, sino que también contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la producción de subproductos valiosos como fertilizantes. Aunque el estudio se centra en un

contexto comunitario o rural, sus resultados cuantificados sobre ganancias de eficiencia son directamente extrapolables al análisis de sistemas a mayor escala en entornos urbanos.

Por su parte, Silva (2019), aborda la automatización del proceso de compostaje mediante el uso de sensores para el monitoreo y control en tiempo real de parámetros críticos como humedad y temperatura. También argumenta que este enfoque proporciona adquisición de datos confiable y permite la toma de decisiones en tiempo real, contribuyendo a un tratamiento optimizado del compost. La conclusión principal es que la automatización del compostaje representa una alternativa sostenible para el problema de la disposición de residuos, al posibilitar un control preciso que mejora la eficiencia del proceso biológico. Este trabajo es fundamental porque conecta explícitamente la tecnología de automatización (uso de sensores) con la eficiencia en el manejo de residuos orgánicos a través del compostaje, un método ampliamente aplicable en los hogares.

Otro estudio analizado se centra en residuos plásticos y no orgánicos, su metodología y hallazgos son ilustrativos. Los autores Tupe Bastidas & Estrella Quispe, 2025, reportan que la automatización del proceso pirolítico incrementó la eficacia general, mejoró la consistencia del producto (aceites combustibles) y redujo sustancialmente la cantidad de desperdicio sólido. Esto demuestra el potencial principio general de que la automatización de procesos de conversión de residuos mejora métricas clave de eficiencia (eficacia, consistencia, reducción de desechos), un principio que podría ser válido para tecnologías que procesan fracciones orgánicas, como la digestión anaeróbica o el compostaje avanzado.

3.3. Estudios relacionados con el compostaje en general

Uno de los antecedentes tempranos en el ámbito institucional es el estudio de Bustamante Sánchez (2014), quien analizó la gestión de residuos sólidos biodegradables en el contexto universitario de Lima. La investigación evidenció una alta proporción de residuos orgánicos dentro del total generado, subrayando la necesidad de estrategias integrales de manejo, entre ellas el compostaje, como mecanismo para mitigar impactos ambientales y mejorar la calidad de vida. El estudio destaca el valor del compostaje en la transformación de residuos orgánicos en biofertilizantes y acondicionadores de suelo, sentando bases conceptuales para enfoques posteriores de sostenibilidad.

En una perspectiva aplicada al contexto urbano y productivo, Jara-Samaniego et al. (2017) evaluaron el desarrollo de fertilizantes orgánicos a partir de residuos de mercados alimentarios y huertos urbanos en Ecuador. El estudio identificó deficiencias estructurales en la gestión de residuos en

países en desarrollo, particularmente la falta de optimización y los riesgos ambientales y sanitarios derivados de la disposición inadecuada. Los resultados demostraron la viabilidad técnica y económica del compostaje, evidenciando una descomposición eficiente de la materia orgánica y la obtención de productos con valor comercial, lo que refuerza el potencial del compostaje como estrategia de gestión sostenible.

Ese mismo año, Soto-Paz et al. (2017) abordaron las tendencias de investigación sobre el compostaje de biorresiduos en países en desarrollo, destacando la elevada proporción de residuos orgánicos en el flujo total de RSU. El estudio enfatizó la necesidad de optimizar los procesos técnicos mediante mejoras operativas y modelos empíricos, particularmente en contextos latinoamericanos como el colombiano, donde el compostaje aún presenta limitaciones en su implementación a gran escala.

Desde una perspectiva normativa y socioeconómica, Vargas-Pineda, Trujillo-González y Torres-Mora (2019) analizaron el compostaje como alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en centrales de abastecimiento en Colombia. El estudio relacionó la problemática de la pérdida de alimentos con la seguridad alimentaria y la gestión de residuos, identificando al compostaje como una estrategia ambientalmente viable en contextos locales específicos.

De manera complementaria, Sánchez-Muñoz, Cruz-Cerón y Maldonado-Espinel (2019) examinaron la gestión de RSU en América Latina desde la perspectiva de la generación, utilizando estadísticas oficiales de nueve ciudades entre 2007 y 2014. Sus hallazgos evidenciaron avances normativos, como la prohibición de vertederos a cielo abierto y la inclusión de recicladores, así como una correlación entre factores socioeconómicos (ingreso per cápita y cobertura educativa) y los patrones de generación de residuos. No obstante, el estudio subrayó que la limitada concienciación ciudadana continúa siendo un desafío social clave.

En el contexto peruano, Montesinos, Tudela Mamani y Huamaní Peralta (2020) analizaron la gestión de residuos sólidos en la ciudad de Juliaca, identificando problemas de gobernanza, impacto social y riesgos para la salud pública. El estudio determinó que una proporción significativa de los residuos era reutilizable y que la gestión de la composta presentaba una rentabilidad positiva, lo que refuerza la viabilidad económica del aprovechamiento de residuos orgánicos.

Posteriormente, Palancar et al. (2021) destacaron el papel central de la educación ambiental, la separación en origen y el compostaje como pilares fundamentales del cuidado ambiental. El estudio enfatizó la importancia del reconocimiento social de los recolectores y del apoyo estatal, señalando

que la adopción del compostaje depende en gran medida de factores sociales, educativos e institucionales.

En el ámbito del desarrollo sostenible, Salas Vizcarra (2022) analizó la gestión social en América Latina y el Caribe, resaltando su relevancia para la promoción de prácticas sostenibles, entre ellas la gestión de residuos. Aunque el estudio no se centró exclusivamente en el compostaje, aportó un marco analítico útil para comprender la influencia de la gestión social y las dinámicas comunitarias en la adopción de prácticas ambientales.

Ese mismo año, Rodríguez Guerra y Baca-Cajas (2022) realizaron un análisis de más de una década sobre la gestión de RSU en países de Europa y América, identificando como puntos críticos la deficiente separación en origen y la ausencia de educación ambiental. Estos factores históricos y sociales se presentan como barreras estructurales para el desarrollo del compostaje en América Latina.

Desde el ámbito rural, Carvalho y Casas Ciri3n (2022) analizaron el compostaje y los biodigestores como soluciones a la problemática de los residuos orgánicos, destacando la transición hacia una economía circular como respuesta al crecimiento poblacional y la presión sobre los recursos naturales. El estudio subrayó los beneficios ambientales, sociales y económicos de estas prácticas, vinculadas a procesos históricos de sostenibilidad y gestión de recursos.

En el contexto institucional, Alanís Ramírez et al. (2022) propusieron un modelo de gestión de residuos orgánicos con enfoque de ciclo de vida, aplicado en hogares e instituciones educativas. A través de encuestas de percepción, se evidenció un cambio positivo en el comportamiento ecológico de los estudiantes, lo que refuerza el papel del compostaje como herramienta formativa y de transición hacia modelos circulares.

Más recientemente, Chac3n Chavarría (2023) analizó el compostaje domiciliario como estrategia de adaptación climática en Costa Rica, señalando que el modelo histórico de recolección indiscriminada de residuos, vigente desde la década de 1970, ha condicionado las prácticas actuales de gestión. El alto porcentaje de residuos orgánicos generados refuerza la necesidad de promover una nueva cultura ambiental basada en el compromiso intersectorial.

En el ámbito técnico, Ríos-Velásquez et al. (2023) evaluaron la caracterización de la composta producida a partir de residuos orgánicos urbanos en seis distritos de la provincia Leoncio Prado, Perú.

Los resultados indicaron que el compostaje es una práctica ampliamente adoptada, aunque con niveles intermedios de calidad, lo que sugiere oportunidades de mejora en los procesos técnicos.

En 2024, diversas investigaciones profundizaron en dimensiones sociales, normativas y técnicas del compostaje. Moreno y Schamber (2024) analizaron la fracción orgánica de los RSU en Argentina, destacando la introducción de normativas nacionales en 2019 como un factor histórico determinante para promover el reciclaje de residuos orgánicos, que representan aproximadamente el 50 % de los RSU. El estudio, de enfoque cualitativo, examinó experiencias que evidencian tanto desafíos como potencialidades en la región metropolitana de Buenos Aires.

Desde una perspectiva comunitaria, Porras Barquero y Fournier Rodríguez (2024) estudiaron un proyecto piloto de valorización de residuos orgánicos mediante compostaje en el asentamiento Valle Real Santa Cecilia, en La Cruz, Guanacaste (Costa Rica). La investigación destacó la cohesión comunitaria y la colaboración intersectorial (entre productores locales, academia y autoridades municipales) como factores sociales clave para el desarrollo del compostaje en contextos de bajo progreso social.

En el ámbito educativo, Estupiñán Quiñones et al. (2024) analizaron el compostaje como estrategia pedagógica en la Institución Educativa Bilingüe Awá Técnico Agroindustrial Pianulpí, evidenciando mejoras significativas en la conciencia ambiental y en las actitudes estudiantiles, a partir de una metodología constructivista con participación activa.

Desde un enfoque técnico, Parra-Orobio, Soto-Paz y Oviedo-Ocaña (2024) examinaron los avances en el mejoramiento del compostaje de residuos verdes en países en desarrollo, identificando estrategias efectivas para reducir los tiempos de proceso y mejorar la calidad del compost, pese a las limitaciones impuestas por las características fisicoquímicas de los residuos.

Finalmente, Clavijo Cevallos et al. (2025) analizaron la gestión de residuos orgánicos en mercados del cantón Saquisilí, Ecuador, destacando el compostaje con lombrices californianas como una estrategia viable que reduce impactos ambientales y mejora la percepción comunitaria, consolidando la relevancia del compostaje en contextos locales de América Latina.

3.4. Estudios relacionados con la automatización

Desde una perspectiva participativa aplicada al ámbito rural, Contreras Contreras (2018) analizó el manejo integral de excretas de ganado en sistemas de producción de traspatio en la microcuenca La Joya, Querétaro. El estudio evidenció que la adopción de tecnologías de compostaje está condicionada por factores socioeconómicos, la facilidad de uso, la participación familiar, la rentabilidad y los beneficios ambientales percibidos. Mediante un enfoque participativo que incluyó talleres formativos, módulos demostrativos y visitas de seguimiento a 16 unidades productivas, con la participación de 45 productores, la investigación destacó la importancia de la apropiación social del conocimiento para la implementación sostenible del compostaje en contextos rurales.

En un contexto urbano, Plasencia-Vélez, González-Pérez y Franco-García (2018) propusieron un modelo circular de compostaje residencial en la Ciudad de México, subrayando que la participación social constituye un factor determinante para el éxito de los proyectos comunitarios. A partir de encuestas, entrevistas a actores clave y el análisis de experiencias internacionales, el estudio demostró que las iniciativas de base comunitaria dependen en gran medida del involucramiento ciudadano y de la construcción de redes de cooperación para consolidar prácticas sostenibles de gestión de residuos orgánicos.

Posteriormente, De Souza y Drumond (2023) examinaron el potencial del compostaje descentralizado en comunidades cerradas, identificándolas como entornos organizativamente favorables debido a su estructura administrativa y disponibilidad de recursos. El estudio, basado en cuestionarios en línea aplicados a 106 residentes de 25 condominios, identificó factores que favorecen la adopción, como la predisposición a la separación de residuos, así como obstáculos relevantes, entre ellos la ausencia de liderazgos comunitarios, la falta de conocimiento técnico y el temor a problemas sanitarios, como olores o plagas.

Desde una perspectiva tecnológica aplicada al compostaje, Patiño-Forero, Méndez y Zuluaga (2023) analizaron la automatización de una planta de compostaje aeróbico de estiércol avícola mediante sistemas de aireación forzada y monitorización remota. Los resultados indicaron que la integración de tecnologías automatizadas, incluyendo sensores e IoT, permite optimizar parámetros críticos como temperatura, humedad y oxigenación, acelerando la degradación biológica. El estudio concluyó que los sistemas automatizados contribuyen significativamente a la sostenibilidad ambiental y al fortalecimiento de modelos de economía circular, particularmente en contextos geográficos específicos como regiones montañosas.

En un estudio relacionado con la automatización en entornos rurales, Quinde Almeida y Barbery Montoya (2023) analizaron los factores que inciden en la asignación de recursos para la automatización de sistemas de riego en Cuenca, Ecuador. Aunque el foco principal no fue el compostaje, los resultados aportan evidencia relevante sobre los factores que influyen en la adopción tecnológica en comunidades rurales, destacando el peso de los factores ambientales. La investigación, basada en encuestas aplicadas a 100 sujetos y con alta fiabilidad estadística, ofrece un marco útil para comprender procesos similares en proyectos de compostaje automatizado.

En el ámbito del compostaje comunitario inteligente, González Pedraza et al. (2024) exploraron la integración de sensores IoT para mejorar la gestión eficiente de residuos orgánicos. A través de pruebas piloto, el estudio evidenció que la automatización contribuye a mejorar la calidad de la composta y a fortalecer la participación comunitaria, al facilitar el monitoreo y la toma de decisiones. No obstante, se identificaron limitaciones asociadas a los costos iniciales, la conectividad y las necesidades de mantenimiento, factores que influyen directamente en la viabilidad y escalabilidad de estos proyectos.

Desde una perspectiva tecnológica más amplia, Gómez Peñafiel y Estrella Quispe (2025) analizaron la automatización del proceso de producción de biogás mediante biodigestores, destacando que el uso de sensores y sistemas automatizados incrementa la eficiencia operativa, reduce emisiones de gases de efecto invernadero y disminuye la dependencia de la supervisión manual. La investigación experimental cuantitativa demostró que la automatización constituye un factor clave para la adopción de tecnologías de tratamiento de residuos orgánicos en distintos contextos comunitarios.

Finalmente, Veizaga Balta et. al., (2025) realizaron una exhaustiva revisión sistemática que aborda la vanguardia del monitoreo y control del proceso de compostaje automatizado. Este estudio se centró específicamente en el uso de microcontroladores Raspberry Pi como plataforma central para la gestión del proceso. La investigación analizó la integración y el rendimiento de un conjunto clave de sensores: de gases, de temperatura (para identificar fases termofílicas y mesofílicas), de pH (para asegurar el ambiente microbiano óptimo), y de humedad (vital para la actividad biológica y la porosidad del material).

La principal conclusión del trabajo de Veizaga Balta et al., (2025) subraya la importancia crítica de la recopilación continua y en tiempo real de los datos generados por estos sensores. Esta información ininterrumpida y detallada es lo que permite implementar un control mucho más preciso y dinámico de los parámetros operativos del compostaje. Al poder ajustar automáticamente variables como la aireación, el volteo o la adición de agua basándose en lecturas inmediatas, se logra una mejora

significativa en la eficiencia del proceso, acelerando la degradación de la materia orgánica y optimizando la calidad del producto final. Asimismo, esta gestión avanzada contribuye a una mayor estabilidad del proceso, minimizando los riesgos de putrefacción, la generación de malos olores o la pérdida de nutrientes.

Aunque los autores optaron por no especificar el número exacto de estudios que conformaron el corpus de su análisis, el empleo de la metodología de revisión sistemática confiere una base epistemológica y metodológica robusta a sus hallazgos. Esto les permite no solo validar la viabilidad técnica del compostaje automatizado basado en IoT y microcontroladores, sino también consolidar esta aproximación como una estrategia emergente y fundamentalmente necesaria para enfrentar los desafíos modernos de la gestión sostenible de residuos orgánicos a gran escala. La automatización, por lo tanto, trasciende la mera conveniencia para convertirse en un pilar tecnológico para la circularidad de los recursos.

3.5. Estudios relacionados con la Microbiología

El estudio de Costa, (2016) constituye un antecedente fundamental en la comprensión del compostaje como un proceso biológico, definido como la descomposición y estabilización de sustratos orgánicos mediante la acción coordinada de diversos microorganismos. La investigación destaca que bacterias, hongos y actinomicetos desempeñan un papel central en la mineralización de la materia orgánica, transformándola en compuestos más estables y aprovechables. Este enfoque permite comprender el compostaje como un sistema dinámico gobernado por interacciones microbiológicas que determinan la eficiencia del proceso.

En una línea complementaria, Salazar Arce (2016) revisó la actividad microbiana en el compostaje aeróbico de residuos sólidos orgánicos, enfatizando la sucesión de comunidades microbianas mesófilas y termófilas a lo largo del proceso. El estudio señaló que la eficiencia de la degradación de la materia orgánica depende directamente de la diversidad y actividad metabólica de estas comunidades, las cuales facilitan la aceleración de la descomposición y la estabilización del material compostado.

Posteriormente, Villegas-Cornelio y Canepa (2017) analizaron los avances en el vermicompostaje como una alternativa biotecnológica para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. El estudio describe este proceso como una interacción sinérgica entre lombrices y microorganismos bajo condiciones aeróbicas y mesófilas. Se destaca el papel de la biodiversidad microbiana y de la

actividad enzimática en la degradación de la materia orgánica, así como en la mejora de la calidad final del vermicompost.

Ese mismo año, Sánchez, Ospina y Montoya (2017) abordaron el compostaje como un proceso mediado por microorganismos, identificando los principales grupos microbianos involucrados y las estrategias para su suplementación mediante nutrientes e inóculos. La revisión enfatizó que la actividad microbiana regula procesos clave como la descomposición de polímeros orgánicos complejos y la humificación, subrayando la importancia de comprender la dinámica microbiana para optimizar el proceso.

De manera similar, Ribeiro et al. (2017) evaluaron el uso de aditivos microbianos en el compostaje, destacando que los inóculos bacterianos influyen significativamente en la mineralización y humificación de la materia orgánica. El estudio evidenció que determinadas bacterias afectan la degradación de celulosa y hemicelulosas, así como parámetros críticos como la temperatura y el contenido de nitrógeno, demostrando el impacto directo de la manipulación microbiana en la eficiencia del proceso.

Desde un enfoque bioquímico, Mena Espino, Mena Espino y Tavera Cortés (2017) analizaron el papel de las enzimas y microorganismos en la transformación de residuos lignocelulósicos durante el compostaje. La revisión identificó enzimas clave (como celulasas, hemicelulasas y ligninasas) responsables de la biotransformación de nutrientes orgánicos, destacando que el conocimiento de estos procesos enzimáticos es esencial para una gestión eficiente de los residuos orgánicos.

Más adelante, Vásquez Castro y Millones Chanamé (2021) realizaron una revisión exhaustiva sobre la diversidad microbiana y su rol en el compostaje aeróbico. El estudio destacó la interacción entre parámetros físico-químicos (temperatura, pH, humedad y relación C/N) y la abundancia microbiana, señalando que la actividad metabólica de bacterias y hongos es determinante para la degradación de la materia orgánica y la maduración del compost. Asimismo, se analizó el uso de microorganismos exógenos con actividad lignocelulolítica como estrategia para reducir los tiempos de compostaje y mejorar la calidad del producto final.

Posteriormente, Da Silva et al. (2023) examinaron los microorganismos presentes en el compostaje y los factores que interfieren en su actividad. A partir del aislamiento y análisis de muestras obtenidas en sistemas de compostaje, el estudio concluyó que la eficiencia del proceso depende de la provisión de condiciones óptimas que favorezcan la multiplicación y actividad microbiana, reafirmando el papel central de los microorganismos en la transformación de la materia orgánica.

En una aplicación práctica orientada a la optimización del proceso, Castro-Hernández, Navarro-Flores y Castro-Barquero (2023) evaluaron la adición de inóculos microbianos en un compost comercial. Los resultados evidenciaron mejoras significativas en las características de calidad del compost, confirmando que la incorporación controlada de microorganismos potencia los procesos microbiológicos responsables de la descomposición y estabilización de la materia orgánica.

Finalmente, Tola Garfias et al. (2024) analizaron la dinámica de las propiedades físicas y químicas del compostaje mediante la aplicación de diferentes dosis de microorganismos eficientes. El estudio demostró que dosis más elevadas favorecen un mejor control de la temperatura, una mayor higiene del proceso y una fijación más eficiente del nitrógeno, lo que se traduce en una mejora de la actividad biológica y de la estabilidad del compost. Estos hallazgos refuerzan la relevancia de los microorganismos como agentes clave en la calidad y sostenibilidad del compostaje.

Como conclusión, la revisión exhaustiva del estado del arte confirma la tendencia global hacia la automatización como la estrategia tecnológica esencial para superar las limitaciones históricas del compostaje (como los largos tiempos de ciclo, la necesidad de espacio y la inconsistencia operacional). Los estudios existentes han validado que la implementación de sistemas tecnificados en escalas piloto o industriales logra reducir el tiempo de procesamiento hasta en un 67% y la dependencia de la mano de obra manual hasta en un 80%.

En cuanto a la comparación y la originalidad, se encuentra que la brecha fundamental identificada es la escasez de soluciones tecnológicas compactas y mecánicamente robustas diseñadas específicamente para la gestión de residuos orgánicos en el entorno doméstico urbano con severas restricciones de espacio. La originalidad de esta tesis reside en abordar esta limitación. Se pasa de la validación conceptual de la automatización a la implementación y validación de un prototipo de pequeña escala (tipo tómbola octogonal) que integra control y actuación electromecánica (motor NEMA23 y controladora DM556) para manipular activamente los parámetros de aireación y temperatura. Este trabajo no solo aplica la tecnología, sino que la adapta para resolver la principal barrera infraestructural del compostaje descentralizado en entornos de alta densidad poblacional.

Esta investigación presenta una solución tecnológica compacta al desarrollar un compostador automatizado, viable para espacios urbanos limitados y resolviendo un desafío clave en la gestión de residuos urbanos. La validación empírica de eficiencia demostró que el control dinámico de variables aceleró el procesamiento, logrando reducir la fase mesófila de 9 a 6-7 días y la de enfriamiento de 27 a 24 días. Además, el prototipo contribuye a la democratización de la economía circular al facilitar a

las familias urbanas la revalorización de sus residuos orgánicos con mínima intervención, apoyando directamente la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 11 y 12.

Capítulo IV

4. Metodología de Solución

4.1. Selección de variables a automatizar

El presente proyecto de investigación se centra en el desarrollo de un sistema para la instrumentación y el automatizado de las variables que rigen el proceso de descomposición aeróbica de la materia orgánica, con el objetivo primordial de optimizar y reducir el tiempo de producción de compost de alta calidad.

El fundamento teórico y experimental de esta propuesta radica en la gestión activa de las variables más críticas para el proceso de compostaje: la humedad y la temperatura. Estas variables están intrínsecamente ligadas a la actividad metabólica de las poblaciones microbianas responsables de la bio-oxidación del sustrato.

Para la regulación eficiente de estos parámetros, el sistema propuesto incorpora mecanismos de aireación/homogeneización del sustrato. Esto se logra mediante giros controlados y programados de la masa orgánica. Este control de movimiento es esencial por dos razones principales, primero los volteos controlados permiten disipar el exceso de calor generado durante las fases termofílicas (que pueden alcanzar hasta 75 °C), previniendo la inhibición de la actividad microbiana y la desnaturalización de enzimas. De igual forma, en periodos de baja actividad, el aislamiento puede ayudar a retener el calor. Y segundo, el volteo asegura la distribución uniforme del agua y evita la formación de zonas anaeróbicas. La disponibilidad de oxígeno (O₂) es fundamental para mantener la eficiencia del proceso aeróbico y prevenir la generación de compuestos olorosos indeseables (característicos de la putrefacción).

Este proyecto busca, por lo tanto, establecer un protocolo de gestión dinámica que, basado en la lectura continua de sensores (AM2305 y DHT11.), aplique las acciones necesarias (homogeneización de la materia mediante la rotación del compostador) fomentando que el proceso se desarrolle dentro de los parámetros adecuados, como se muestra en la Fig. 7

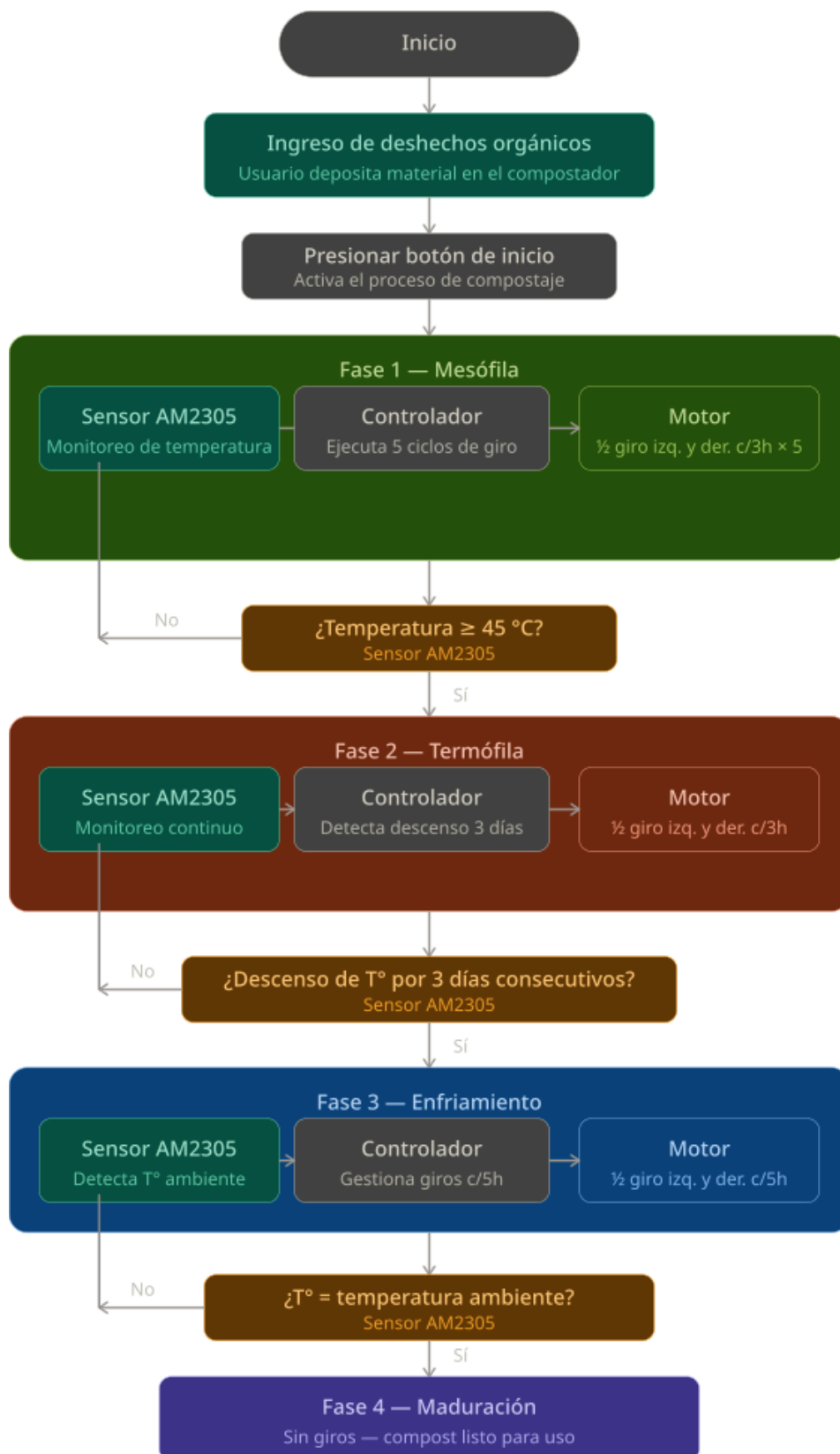


Fig. 7. Representación de funcionamiento general del sistema propuesto.

4.1.1. Humedad

El agua es un factor limitante e indispensable para el sustento de la vida y la actividad microbiana. Por ello el monitoreo de la humedad se realiza mediante un sensor colocado en la parte interna del compostador, se realiza un seguimiento constante del contenido hídrico del material orgánico. La programación está configurada para vigilar los niveles de humedad entre el 40% y el 60%, un rango que ha demostrado ser crítico para optimizar la actividad de las bacterias y hongos que impulsan el proceso de descomposición.

Este control hídrico estricto no solo asegura una eficiencia metabólica y proliferación de los microorganismos descomponedores, sino que también ofrece un doble beneficio: la prevención de compuestos nocivos y el control de olores. Al evitar el exceso de humedad, se impide la formación de zonas de anaerobiosis localizada, lo que inhibe la generación de subproductos malolientes, como el sulfuro de hidrógeno y el amoníaco, que son típicos del compostaje no asistido.

4.1.2. Temperatura

El diseño del sistema de compostaje automatizado se fundamenta en la integración de dispositivos de monitoreo del proceso biológico, incorporando un conjunto de sensores de temperatura distribuidos tanto al interior como en el exterior del compostador, para la adquisición de datos en tiempo real, los cuales constituyen la fuente primaria de información para el sistema de automatización.

Un componente crítico y esencial de este diseño es la regulación dinámica de la fase termófila, el pico de actividad microbiana, mediante la programación del sistema para mantener la temperatura del material dentro del rango óptimo predefinido de 45 °C a 75 °C. Este control térmico persigue dos objetivos fundamentales: primero, la aceleración de la descomposición orgánica al lograr la tasa de actividad de los microorganismos termófilos, lo que resulta en una significativa mineralización y estabilización de la materia; y segundo, la sanitización completa del producto final, pues el mantenimiento sostenido de altas temperaturas (generalmente por encima de 55 °C) es el mecanismo clave para la inactivación total de agentes patógenos, la eliminación de larvas de insectos nocivos y la destrucción de la viabilidad de las semillas de malezas, asegurando así un compost seguro e higienizado.

Finalmente, la automatización del sistema no solo se limita al monitoreo, sino que también comprende la activación del mecanismo de actuación (mediante la rotación y la homogeneización de la materia) para corregir desviaciones y sostener el nivel térmico dentro de los límites establecidos, logrando la

uniformidad y eficiencia del proceso.

4.1.3. Aireación y homogeneización

La descomposición aeróbica requiere un suministro de oxígeno, un proceso conocido como aireación. Para superar las inconsistencias e intensidad de mano de obra del volteo manual tradicional, el sistema incorpora un diseño de rotación electromecánico automatizado. Este sistema procesa el material orgánico dentro de una cámara en forma de tómbola octogonal, equipada con deflectores internos, permitiendo así la aireación de la materia.

La rotación programada de este sistema cumple una doble función: primero, facilita una renovación gaseosa constante, promoviendo la entrada de aire fresco y la expulsión eficiente de gases efluentes ricos en dióxido de carbono. Esta acción mantiene las condiciones aeróbicas necesarias, eliminando la necesidad de sistemas complejos de ventilación forzada o del volteo manual poco viable en entornos residenciales. Segundo, la rotación programada alcanza una exposición homogénea del material orgánico a las condiciones de humedad y temperatura, lo que es deseable para prevenir la formación de gradientes térmicos, zonas de compactación o resequedad que deprimirían la tasa de degradación.

La implementación de la automatización en el compostador doméstico se traduce en la capacidad de establecer un monitoreo de parámetros clave (humedad y temperatura) y una gestión dinámica de la aireación/homogeneización mediante un sistema rotacional. Este enfoque provee una alternativa a dos de las principales restricciones de los sistemas de compostaje manual: la variabilidad e inconsistencia operacional (que depende de la intervención del usuario) y la consecuente extensión de los tiempos de procesamiento.

4.2. Diseño del compostador automatizado

4.2.1. Estructura física

El diseño del compostador automatizado constituye el pilar fundamental del proyecto, al proponer una solución integral y viable para la gestión de residuos orgánicos domésticos en los entornos urbanos, donde la limitación de espacio es la principal restricción. La concepción del sistema aborda las barreras operativas de los compostadores tradicionales, tales como el requerimiento de grandes

superficies y la complejidad física del volteo manual, mediante una estructura compacta y un mecanismo de operación autónomo.

La configuración estructural se fundamenta en un prisma octagonal tipo tómbola, una elección de diseño deliberada para alcanzar la eficiencia volumétrica de procesamiento dentro de un área de instalación reducida, como se muestra en la Fig. 8. El volumen útil de procesamiento está estimado en 20 L a 30 L (aunque por el diseño, se cuenta con un volumen interno de un poco más de 70 L), una capacidad significativa para una unidad doméstica, contenida en una superficie de instalación que no excede el metro cuadrado.

Esta forma es importante, ya que permite la adaptación e integración fluida del equipo a espacios limitados y comunes en viviendas urbanas, como balcones, terrazas o pequeños patios de servicio. La durabilidad y la higiene del sistema se logran gracias al material de construcción, que consiste en láminas de plástico antibacterial de alta resistencia (según el fabricante).



Fig. 8. Compostador prefabricado con formato octogonal. Se aprecian las muescas que hacen la función de deflectores internos.

4.2.1.1. Mecanismo de operación y rotación

El mecanismo de operación se fundamenta en una unidad de rotación eléctrica de alta eficiencia,

diseñada para optimizar el proceso de homogeneización de la materia orgánica. Esta unidad incorpora un motor NEMA 23, seleccionado por su relación óptima entre tamaño compacto y par motor. Dicho motor se encuentra rígidamente acoplado al eje central de la tómbola octagonal. La transmisión del movimiento se efectúa a través de un sistema de cadena con una relación de reducción de 3:1 (Fig. 9). Esta configuración mecánica logra que la tómbola complete una rotación por cada tres revoluciones del motor, lo que permite generar el par torsional necesario para movilizar el sustrato, característicamente pesado y húmedo, manteniendo simultáneamente la velocidad requerida para una aireación del material.

La implementación de este sistema mecánico es punto relevante para la eficiencia operativa del compostaje, pues su función primordial es eliminar la necesidad del volteo manual. La característica distintiva de este sistema es la rotación programada y automatizada. Al girar el tambor según las condiciones del material al interior del compostador y a una velocidad controlada, se logra la aireación constante y homogénea del sustrato. Esta aireación continua es benéfica para varios fines: suministrar el oxígeno para el metabolismo de los microorganismos aeróbicos; controlar la temperatura al prevenir la formación de zonas anaeróbicas y disipar el calor metabólico excesivo; y mezclar el sustrato para distribuir uniformemente la humedad, los nutrientes y los microorganismos, acelerando así el proceso de compostaje.

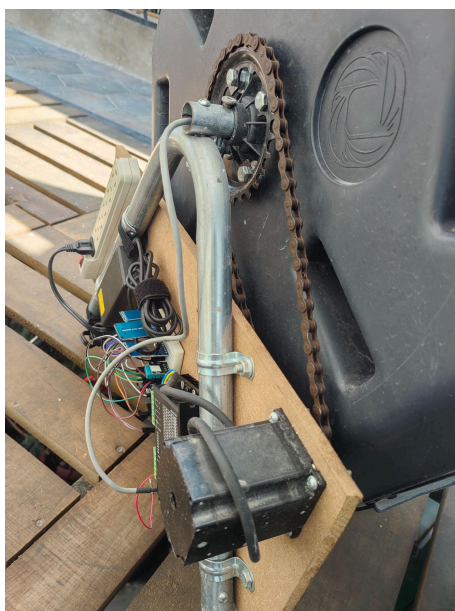


Fig. 9. Motor NEMA23 instalado en el compostador. Se agregó un sistema de estrellas y cadena de bicicleta con relación 3:1.

4.2.1.2. Deflectores internos

Con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso de compostaje, el interior del cuerpo octagonal incorpora placas internas, denominadas deflectores internos, mostrados en la Fig. 10. El diseño de estas placas es de importancia, ya que su propósito es forzar, dirigir y lograr el movimiento de la mezcla y la consecuente la homogeneización del sustrato orgánico durante cada ciclo de rotación. Esta implementación en el diseño interno, en combinación con la configuración geométrica octagonal, ha sido relevante para el rendimiento del sistema.

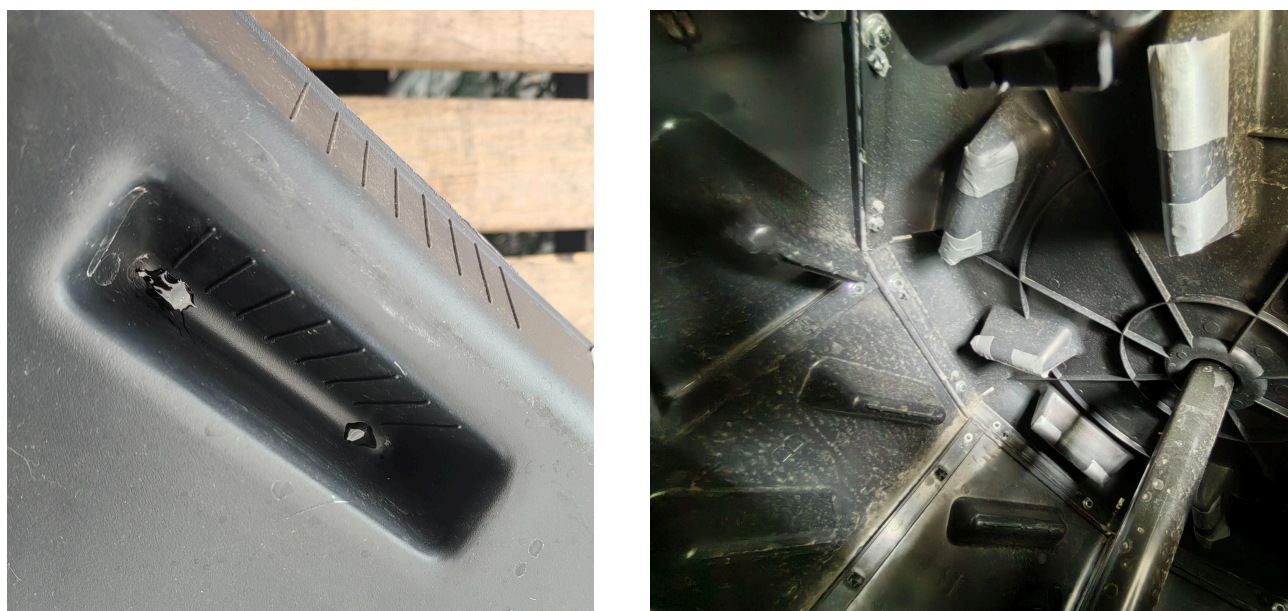


Fig. 10. Deflectores internos. Estas placas dirigen el movimiento y homogeneizan el sustrato orgánico durante la rotación.

Cabe destacar que el sistema prefabricado, cuyo diseño y funcionalidad se orientaban a la optimización del proceso de compostaje, presentaba una serie de perforaciones inherentes a su estructura. Ante esta situación, se implementó una estrategia correctiva, consistente en la obturación meticulosa de cada una de estas perforaciones. Para este fin, se seleccionó un adhesivo epóxico de alta resistencia y durabilidad, conocido por sus propiedades sellantes y su capacidad para formar una barrera impermeable y químicamente inerte.

El propósito de esta intervención fue de importancia para el éxito del proceso de compostaje: en primer lugar, evitar la exfiltración incontrolada de lixiviados, que son los líquidos resultantes de la percolación a través del material orgánico y que, sin el debido control, pueden contaminar el subsuelo y las fuentes de agua circundantes, comprometiendo la integridad ambiental del sitio. En segundo lugar, la obturación busca prevenir la penetración de fauna nociva (como insectos o plagas) en el material de compostaje, lo que podría no solo desestabilizar el proceso biológico de descomposición e hibridarlo con microorganismos indeseados, sino también representar un riesgo sanitario y un factor de dispersión de vectores patógenos. Por ende, esta acción de sellado no fue un mero detalle constructivo, sino una medida técnica que permite la salubridad y el adecuado funcionamiento del sistema de compostaje.

4.2.2. Instrumentación del compostador

El diseño se fundamenta en un sistema con sensores y actuadores, diseñado para la monitorización continua y en tiempo real de las variables críticas que determinan la actividad microbiana y, consecuentemente, el tiempo de producción del compost.

Componentes de automatización

El control y la gestión total del sistema recaen en la placa de desarrollo Arduino Uno R3, que actúa como la Unidad Central de Procesamiento (CPU). Este microcontrolador se encarga de procesar e interpretar los datos recibidos de los diversos sensores. A partir de esta información sensorial, el Arduino Uno R3 ejecuta las acciones programadas, dirigiendo el comportamiento y movimiento del sistema mecánico.

En ella reside la lógica del sistema y se procesan todas las señales de entrada. Para la interacción con el entorno físico, los sensores están conectados a esta placa de desarrollo. La conexión física es flexible mediante el uso de cables dupont. Estos cables, que tienen terminaciones de pines macho-macho y macho-hembra, facilitan una conexión y desconexión rápida tanto a los puertos de entrada/salida (I/O) de la placa como a los pines de los sensores.

Esta arquitectura, compuesta por la placa central y el conjunto de sensores interconectados mediante el cableado dupont, conforma la base del *hardware* del proyecto. La Fig. 11 ilustra la disposición y el montaje de estos componentes, mostrando cómo la placa interactúa con los demás dispositivos a través de una placa protoboard.

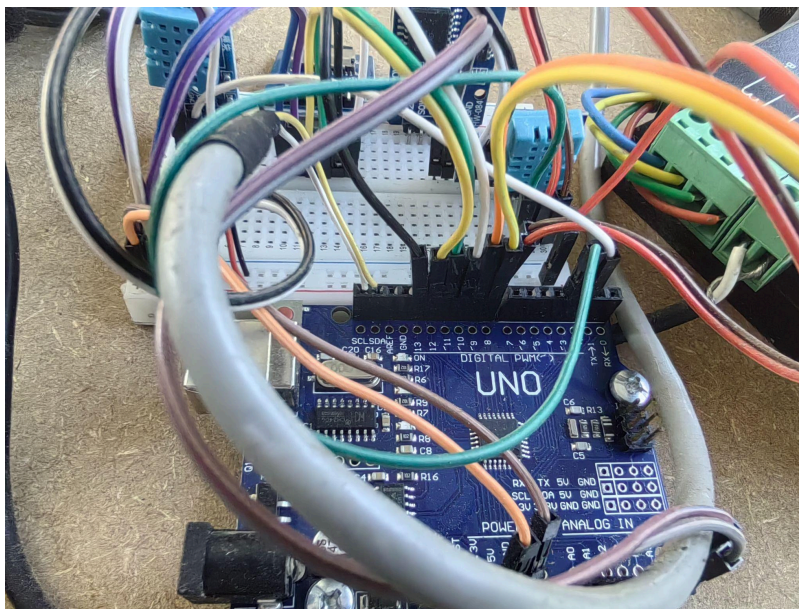


Fig. 11. Placa Arduino Uno R3. Constituye el dispositivo principal de control del compostador.

Para el suministro energético de la placa arduino, se utilizó un cargador de celular de 5V, suficiente para mantener el sistema Arduino trabajando correctamente.

Monitoreo de Variables Críticas y Gestión de Datos

El sistema de monitoreo integra diversos dispositivos para la adquisición y el registro preciso de los parámetros críticos del proceso de compostaje.

Se incorpora un Sensor de Humedad y Temperatura (AM2305), esencial para el monitoreo ambiental interno del compostador, lo que garantiza que las condiciones operativas se mantengan dentro de los rangos óptimos para la actividad microbiana (Fig. 12).

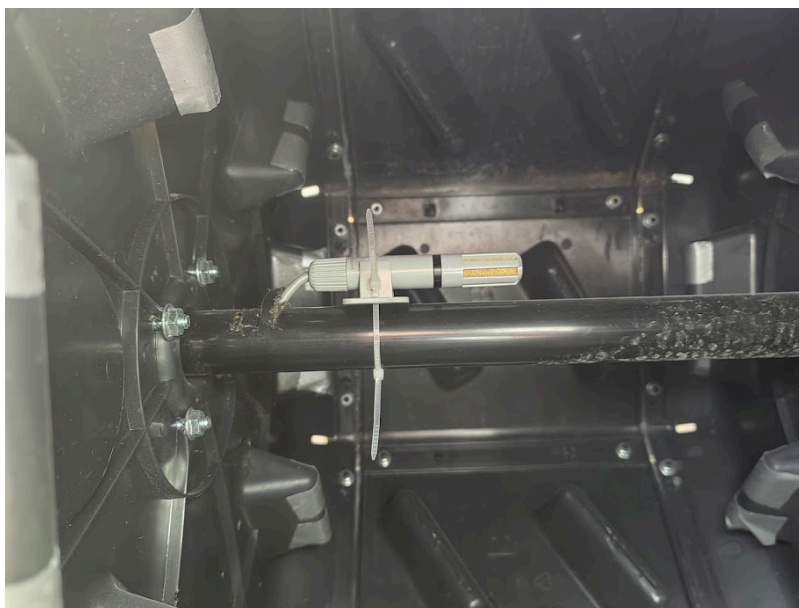


Fig. 12. Sensor AM2305 instalado en el interior del compostador. Fue fijado utilizando cinchos plásticos.

Adicionalmente, se emplea un Sensor de Humedad y Temperatura (DHT11), cuya función es capturar los datos ambientales externos. Esta dualidad de sensores permite establecer una comparativa entre las condiciones internas del proceso de gestación de la composta y las fluctuaciones del medio ambiente circundante. La trazabilidad temporal de los datos se asegura mediante la inclusión de un Módulo Real-Time Clock (RTC), el cual proporciona una datación precisa de cada registro, manteniendo la hora y fecha exactas. Finalmente, la gestión de la información histórica se realiza a través de un Lector de Tarjetas MicroSD que, en conjunto con una Tarjeta MicroSD de 8GB, ofrece una capacidad de almacenamiento suficiente para compilar la totalidad de los registros de humedad y temperatura generados a lo largo de un ciclo experimental completo del compostador. La conexión de estos dispositivos puede ser apreciada en la Fig. 13

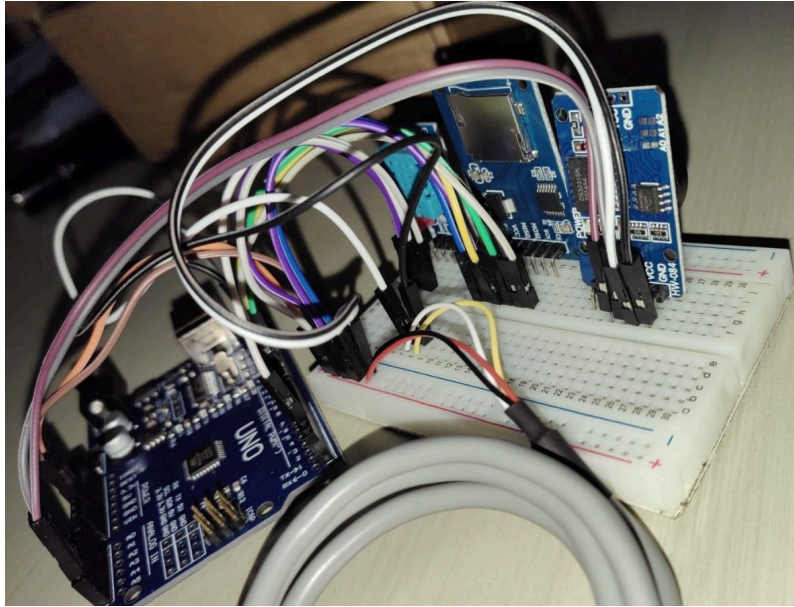


Fig. 13 Componentes conectados a la placa Arduino Uno R3 mediante cables Dupont y Protoboard.

Sistema de Actuación

La gestión del volteo, que es un proceso mecánico, es controlada electrónicamente. El movimiento del prisma octagonal es accionado por un motor a pasos NEMA23 y gestionado por un controlador DM556. Esta configuración permite un control de la rotación del compostador, lo que permite la homogeneización del material y una aireación constante sin requerir la intervención física del usuario.

Esta arquitectura electrónica asegura, el mantenimiento automatizado de las condiciones adecuadas para la temperatura, la humedad y la oxigenación. Esto es esencial para alcanzar la eficiencia del proyecto y reducir su tiempo de procesamiento. La conexión de estos elementos con la placa Arduino Uno R3 se puede apreciar en la Fig. 14



Fig. 14 Driver de control DM556 conectado al motor NEMA23

Para asegurar un funcionamiento electrónico estable, se ha provisto una fuente de poder externa de 20V. Esta tensión de alimentación se consiguió mediante la adaptación de un cargador de laptop comercial. La elección de esta fuente de alimentación específica logra el suministro de la corriente y el voltaje adecuados para operar la etapa de potencia encargada de accionar el motor, manteniendo la integridad del sistema bajo condiciones operativas.

El diagrama de la Fig. 15 muestra la arquitectura completa con tres capas claramente diferenciadas: A la izquierda (en verde), se representan los dos sensores de entrada. El AM2305 es el que determina la lógica de giro; el DHT11 actúa como sensor secundario (para monitorear humedad y temperatura del medio ambiente). La línea punteada marca esa relación de control.

En morado (centro): el Arduino como control central del sistema, recibiendo datos de ambos sensores y enviando las señales STEP/DIR a la controladora DM556.

En coral, ámbar y verde (derecha): la cadena de actuación. La placa Arduino ordena a la controladora DM556, esta alimenta al motor NEMA23, el motor mueve el engranaje y la cadena, y el compostador realiza medios giros (primero hacia un lado y luego hacia el otro)

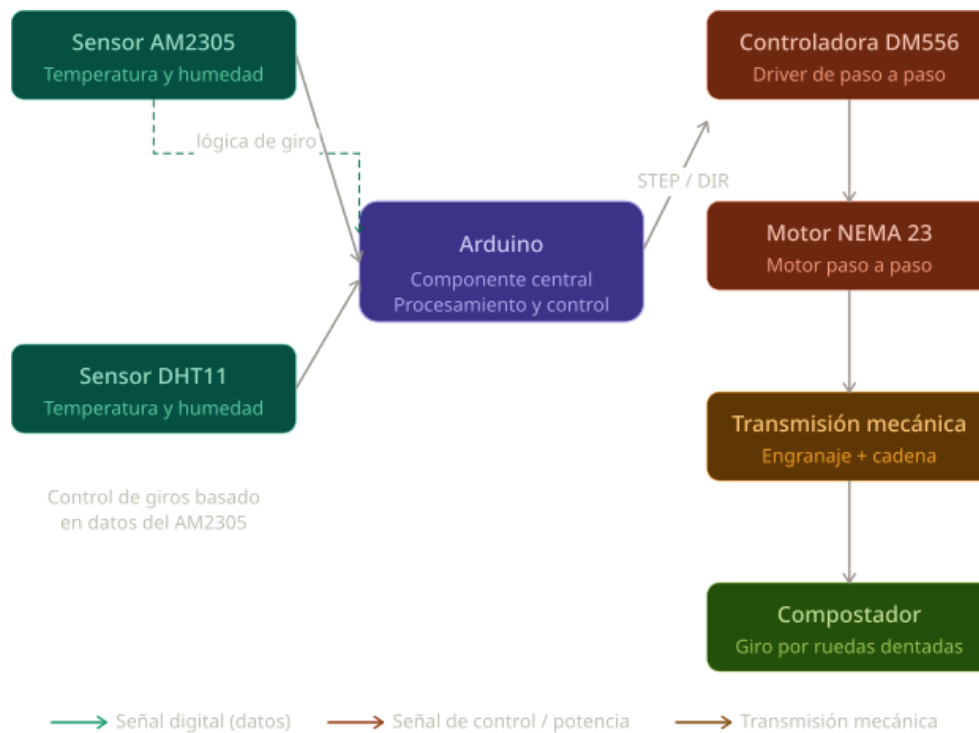


Fig. 15 Se muestra la arquitectura completa con tres capas claramente diferenciadas.

4.2.3. Materiales adicionales utilizados

Además de los componentes electrónicos y de control arriba mencionados, se empleó una serie de materiales estructurales y herramientas para el ensamblaje y acondicionamiento del sistema de compostaje automatizado.

Materiales Estructurales y de Acondicionamiento:

Para la integración física de los componentes electrónicos, se seleccionó una tabla de Fibra de Densidad Media (MDF) de 50x20 cm con 9 mm de espesor, la cual fungió como plataforma de montaje para la placa Arduino y otros elementos periféricos. Esta disposición permitió organizar y proteger el circuito de control, manteniéndolo aislado del ambiente húmedo inherente al proceso de compostaje.

La gestión de la alimentación eléctrica se centralizó mediante una barra multicontacto, dispositivo crucial para energizar el driver del motor Nema23 y prever futuras expansiones del sistema. La integridad estructural y la resistencia a la vibración se logran mediante el uso de tornillería con tuercas de seguridad, las cuales son autoblocantes y previenen el aflojamiento ante la operación continua.

Finalmente, el manejo del cableado se efectuó utilizando cinchos de plástico para la sujeción permanente a la estructura, complementados con cinchos de velcro. Estos últimos facilitaron la agrupación temporal y reutilizable de conductores, permitiendo un manejo más flexible en las fases de ajuste o desmontaje (Fig. 16).



Fig. 16. Muestra los diferentes componentes mencionados fijados a la tabla de MDF y a la estructura del compostador.

Herramientas y Consumibles de Sellado y Conexión:

Para la implementación y el mantenimiento del sistema de compostaje automatizado, se empleó una serie de herramientas e insumos específicos. En la fase de ensamblaje, la estructura requirió el uso de una llave ajustable (perico) de 1.5 pulgadas de apertura para la manipulación de la tornillería estructural.

El sellado de las perforaciones de la aireación se consiguió mediante el uso de adhesivo epóxico (Fig. 17), un sellador bicomponente de alta resistencia que permitió obturar de forma permanente los orificios de ventilación preexistentes. Esta acción fue para lograr la modulación del flujo de aire interno y para evitar el ingreso o escape de gases no deseados en etapas críticas.



Fig. 17. Pegamento epóxico utilizado para sellar las pequeñas perforaciones existentes desde la etapa de fabricación.

Para las sujeciones temporales y los sellados provisionales que requerían una resistencia considerable a la humedad, se seleccionó y empleó cinta americana gris, comúnmente conocida como *duct tape* (cinta de conductos). Este material, reconocido por su durabilidad y adhesión robusta sobre diversas superficies, resultó indispensable en varias etapas del montaje experimental. Su aplicación no solo logró la estabilidad momentánea de los componentes durante el proceso de ensamblaje, sino que también proporcionó una barrera eficaz contra la penetración de agentes externos, un factor crítico en el entorno de trabajo. Específicamente, esta cinta fue utilizada para fijar provisionalmente el sensor AM2305, ocluir pequeñas aberturas en la carcasa y realizar empalmes rápidos y resistentes que pudieran ser fácilmente desmantelados o reemplazados posteriormente (Fig. 18).



Fig. 18. Cinta americana utilizada para sellar temporalmente pequeñas fugas, inherentes al diseño.

La integración de los componentes electrónicos se facilitó con cables Dupont, que proporcionaron conexiones rápidas y seguras entre la placa Arduino y los sensores (AM2305 y DHT11). Para la preparación de la zona que alberga el sensor interno, se requirió el uso de un taladro con broca para metal, herramienta para realizar las perforaciones precisas necesarias para el paso del cableado del sensor AM2305, desde el interior de la pila de compost hacia la conexión externa.

En cuanto al mecanismo de agitación, se utilizó grasa lubricante para cadena, reduciendo la fricción y la corrosión. La transmisión del movimiento se logró mediante la adaptación de estrellas de bicicleta con relación 3:1. Finalmente, la estanqueidad óptima del compostador se aseguró con la aplicación de sellador de silicona antihongos en las uniones de las tapas a presión (Fig. 19), previniendo fugas de lixiviados o gases y el desarrollo de moho en las juntas.



Fig. 19. Sello de silicona antihongos aplicado entre las capas que conforman la estructura del compostador.

Para la fase de preparación de la materia orgánica, se empleó una báscula de cocina para la medición adecuada de la masa de los materiales. Las proporciones de la mezcla inicial se estandarizaron con un recipiente volumétrico (Fig. 20).

Por último, un cuchillo se utilizó como herramienta de corte básica para reducir el tamaño de la materia orgánica voluminosa, facilitando la homogeneización de la mezcla y acelerando el proceso de descomposición inicial.



Fig. 20. Báscula de medición y recipiente para volumetría de la materia orgánica inicial.

4.3. Sistema de automatización

El desarrollo y la implementación inicial del sistema de control se emprendieron sobre la plataforma del Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) de Arduino. La elección de esta herramienta se fundamentó de acuerdo a sus ventajas y la vasta disponibilidad de documentación, librerías preconstruidas y recursos de la comunidad global. Estos factores facilitaron la fase de prototipado, permitiendo una programación ágil de las funcionalidades básicas del sistema. Durante estas etapas preliminares, se adoptó un enfoque de desarrollo iterativo intensivo, donde se ejecutaron múltiples y continuos ciclos de prueba y error en el código fuente para validar la correcta operación y la interacción básica entre el software y los componentes de hardware conectados.

No obstante, la conveniencia inicial de la plataforma Arduino comenzó a manifestar sus limitaciones a medida que el proyecto avanzaba y el sistema de control requería integrar requisitos funcionales considerablemente más complejos y robustos. Las nuevas funcionalidades demandaban una lógica de control más sofisticada; estas inclusiones abarcaban, entre otras:

- **Gestión avanzada y el procesamiento en tiempo real** de datos provenientes de múltiples sensores (como humedad y temperatura relativa, tanto del ambiente como las internas del

compostador).

- **Incorporación de algoritmos de control** más allá de la simple lógica ON/OFF, requiriendo una lógica de decisión más avanzada, temporizadores precisos y manejo de estados.

El aumento del código fuente resultó en un programa con una arquitectura monolítica. La dificultad central de esto residía en la fuerte cohesión y el estrecho acoplamiento de su lógica de control. La mayor parte de la lógica de negocio, las rutinas del hardware, y las funcionalidades de comunicación se concentraron en un único archivo principal (típicamente centralizado las funciones `setup()` y `loop()` en el ecosistema Arduino), lo que resultó en un incremento en la complejidad, el tamaño y la densidad funcional del código fuente.

La adopción no intencional de esta arquitectura monolítica generó consecuencias directas que comprometieron la calidad y la viabilidad a largo plazo del sistema ya que la comprensión del flujo de ejecución del programa y su seguimiento se vieron notablemente obstaculizados debido a la mezcla indiscriminada de implementaciones de código entre las funciones principales, lo que se conoce como una baja cohesión funcional. Esto se podría convertir en un obstáculo para los futuros cambios o adaptaciones que se requirieran.

Además, la profunda interconexión entre las diversas secciones del código fuente implica que la introducción de un error (o algún *bug*) al modificar una funcionalidad puede tener consecuencias colaterales imprevistas y perjudiciales en otras áreas del sistema que, en principio, no parecen estar relacionadas. Localizar la causa raíz de un fallo se transformó en un proceso tedioso, lento y propenso a generar nuevos errores.

Aunado a ello, cualquier intervención en el código, ya fuera correctiva (arreglar un *bug*) o evolutiva (añadir una nueva característica), requería una comprensión casi total de la arquitectura completa del sistema. Esta barrera de entrada al mantenimiento aumentaba el riesgo de introducir nuevos errores de regresión y hacía que el costo y el tiempo de añadir funcionalidad adicional fueran prohibitivos.

Diseño Modular

Frente a esta situación técnica, y priorizando categóricamente la robustez operacional, la mantenibilidad a largo plazo y la escalabilidad futura del sistema, se tomó la decisión de llevar a cabo una refactorización completa del código fuente.

El eje central y la base metodológica de esta reestructuración profunda fue la adopción formal y rigurosa del diseño modular basado en funciones, un principio fundamental de la programación procedimental estructurada. Este nuevo enfoque arquitectónico se implementó siguiendo una metodología de ingeniería de software precisa. Primero, que el programa monolítico fue descompuesto metódicamente en módulos de software más pequeños, autónomos, e intrínsecamente cohesionados. Esta técnica se enfocó en agrupar el código que realizaba tareas relacionadas. Después, que es un principio fundamental de la ingeniería de software: cada nueva función o módulo de código fue diseñado y limitado para encargarse de una única tarea bien definida y delimitada. Esto elevó la cohesión interna de cada módulo.

Y por último, se crearon funciones específicas para aislar las diferentes responsabilidades del sistema. Ejemplos de esta modularización incluyen (El código final se mostrará en el Anexo A):

- *leerAM2305()*: Encargada exclusivamente de la adquisición, el filtrado y el preprocesamiento de los datos provenientes del sensor AM2305.
- *leerDHT11()*: Responsable únicamente de leer las señales de humedad y temperatura del ambiente.
- *rotarCompostador()*: Se encarga de ejecutar las instrucciones necesarias para rotar el compostador, dependiendo de la etapa en que se encuentre.
- *guardarSD()*: Se establecen los parámetros para almacenar la información de los sensores en la tarjeta MicroSD.

La transición del monolito a un diseño modular constituyó una decisión estratégica con un impacto técnico transformador en la calidad del sistema ya que al encapsular la lógica en funciones con nombres descriptivos y responsabilidades claras, el código se volvió auto-documentado y significativamente más fácil de seguir y auditar. Adicional a esto, el aislamiento de las funcionalidades permitió un rápido rastreo y corrección de cualquier error dentro del módulo específico donde se originaba, sin la necesidad de revisar o comprometer el resto del sistema, reduciendo el riesgo de errores de regresión. Y finalmente, las funciones bien definidas y con alta cohesión se convirtieron en componentes reusables. Esto simplifica y acelera la incorporación de futuras funcionalidades o la adaptación del sistema a nuevo hardware o requerimientos, pudiendo alcanzar la escalabilidad futura del proyecto.

La migración de un paradigma de prototipado rápido monolítico a una arquitectura de software

modular y estructurada fue una acción importante para lograr que el sistema de control cumpliera con los criterios esenciales de calidad de software: ser inherentemente funcional, pero, lo que es más importante, ser comprensible, mantenible, robusto y adaptable ante los requerimientos ineludibles de la evolución tecnológica y funcional del proyecto a largo plazo.

4.3.1. Programación del sistema de sensores y almacenamiento de la información

Para determinar la etapa específica del proceso de compostaje en la que se encuentra la mezcla, se implementó un programa de monitoreo que se centrará principalmente en dos parámetros críticos: la humedad y la temperatura. Este seguimiento es de naturaleza constante y sistemática para registrar las fluctuaciones que son indicativas de las diferentes fases del proceso de descomposición microbiana (mesófila, termófila y de enfriamiento).

Adicionalmente, y con el propósito de establecer un contexto ambiental completo para el experimento, se integró un sensor digital de humedad y temperatura ambiental, específicamente el modelo DHT11. Este sensor se encargará de registrar continuamente los datos atmosféricos circundantes (temperatura ambiente y humedad relativa), los cuales son fundamentales para correlacionar los datos y evaluar cómo las condiciones meteorológicas externas influyen en las variaciones de humedad y temperatura dentro de la pila de compost. Lo anterior nos servirá para contar con una validación experimental y servir como una línea base para diferenciar las variaciones internas generadas por el proceso biológico del compostaje de aquellas causadas por los cambios ambientales diarios.

Todos los datos recopilados (temperatura interna, humedad de la mezcla, temperatura ambiental y humedad relativa) serán registrados en una tarjeta MicroSD de 8GB digital para su posterior análisis e interpretación, permitiendo así una determinación precisa de la progresión y finalización de cada etapa del compostaje.

4.3.2. Programación de funciones para cada etapa del compostaje

Se estableció una función para cada etapa del proceso de compostaje. Es importante mencionar que la implementación física de la activación de los LEDs se llevará a cabo en futuras versiones o etapas del desarrollo del proyecto, sirviendo por ahora la función como un componente lógico y base del sistema.

Para la primera etapa, mesófila, se tiene como propósito controlar un indicador visual (LED) para señalar si la temperatura del compostador se encuentra dentro del rango mesofílico o de la fase inicial del proceso de compostaje. En la etapa Termofílica, la temperatura deberá superar los 45 °C, y como tope máximo se estableció un límite de 80 °C (la literatura consultada determina un máximo de 75 °C)

```
void detectarEtapas() {  
    digitalWrite(LED_MESO, (tAM >= 0 && tAM <= 45));  
    digitalWrite(LED_TERMO, (tAM > 45 && tAM <= 80));  
}
```

Código 1. Función para detectar las etapas, implementada en la programación

El código implementado para identificar el inicio de la fase de enfriamiento de la composta emplea un Módulo de Reloj en Tiempo Real (RTC). Este módulo se utiliza para registrar la temperatura varias veces al día. Si el sistema detecta un descenso constante de la temperatura durante un periodo de tres días consecutivos, se activará otro LED. Esta activación sirve para señalar que el proceso de compostaje ha transitado de la fase termófila a la subsiguiente fase de enfriamiento.

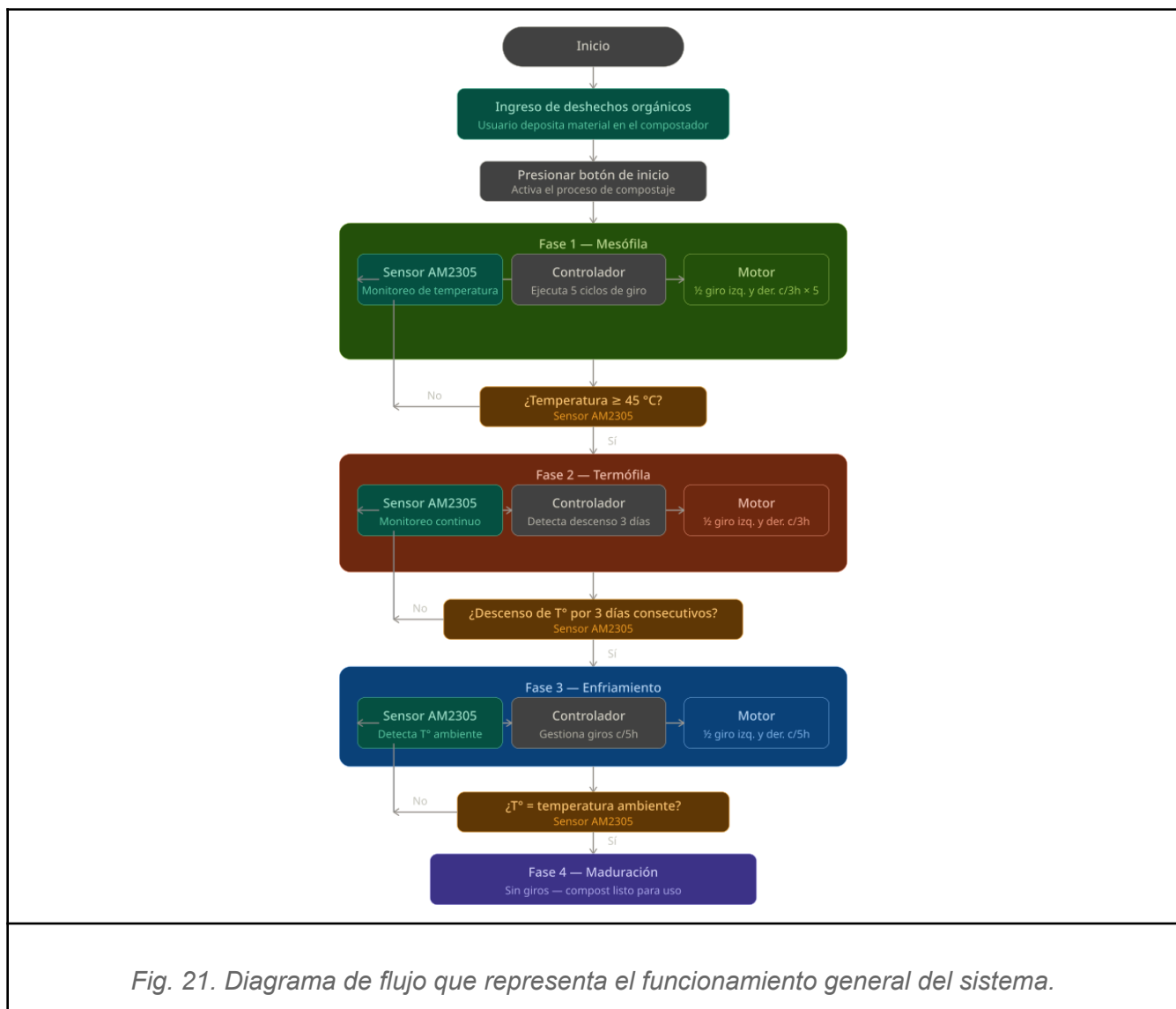
```
void detectarEnfriamientoRTC() {  
    int hora = RTC.getHours();  
    int dia = RTC.getDay();  
  
    if (hora == 12 && dia != ultimoDia) {  
        tempDias[0] = tempDias[1];  
        tempDias[1] = tempDias[2];  
        tempDias[2] = tAM;  
        ultimoDia = dia;  
  
        enfriamiento = (tempDias[0] > tempDias[1] && tempDias[1] > tempDias[2]);  
    }  
  
    digitalWrite(LED_ENF, enfriamiento);  
}
```

Código 2. Función para detectar las etapas, implementada en la programación

4.3.3. Programación del sistema de control de rotación

El sistema incorpora un motor paso a paso NEMA23, controlado mediante un driver DM556, el cual recibe señales de paso (STEP) y dirección (DIR) desde el microcontrolador. El funcionamiento general se ejemplifica en la Fig. 21. El diagrama de flujo refleja cómo interactúan los componentes del sistema a lo largo del proceso:

Los bloques representan las lecturas del AM2305 (y el DHT11 como apoyo), que son las que alimentan cada decisión. Los bloques en coral y azul muestran la cadena de actuación Arduino - DM556 - NEMA 23 en cada fase, con la frecuencia de giro correspondiente. Los rombos en ámbar son las condiciones de transición entre fases, y las flechas grises del lado izquierdo son los ciclos de retroalimentación cuando la condición aún no se cumple.



La rotación se realiza bajo las siguientes condiciones:

- Etapa termofílica: rotación cada 3 horas.
- Etapa de enfriamiento: rotación cada 5 horas.

Cada evento de rotación consiste en:

- Medio giro en un sentido (DIR_PIN, HIGH).
- Medio giro en sentido contrario (DIR_PIN, LOW).

```
void rotarCompostador() {  
    digitalWrite(DIR_PIN, HIGH);  
    for (int i = 0; i < MEDIO_GIRO; i++) {  
        digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);  
        delayMicroseconds(STEP_DELAY);  
        digitalWrite(STEP_PIN, LOW);  
        delayMicroseconds(STEP_DELAY);  
    }  
  
    digitalWrite(DIR_PIN, LOW);  
    for (int i = 0; i < MEDIO_GIRO; i++) {  
        digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);  
        delayMicroseconds(STEP_DELAY);  
        digitalWrite(STEP_PIN, LOW);  
        delayMicroseconds(STEP_DELAY);  
    }  
}
```

Código 3. Función para activar la controladora DM556 y lograr los medios giros del compostador.

Este movimiento evita la compactación del material y promueve una degradación uniforme.

4.4. Diseño de ciclos de experimentación

4.4.1. Protocolo Experimental

El protocolo se organizó en tres ciclos experimentales hasta la etapa de enfriamiento de compostaje, diseñados para evaluar el desempeño del sistema bajo condiciones contrastantes. El Ciclo 1 operó como prueba de concepto en condiciones semicontroladas de invierno. El Ciclo 2 evaluó el rendimiento durante la primavera, con mayor exposición a las variaciones climáticas naturales. El Ciclo 3 constituyó una prueba de estrés, realizado en las condiciones frías del invierno con las condiciones de un entorno doméstico real.

Preparación de la Materia Prima y Carga Inicial

La materia prima consistió en una mezcla representativa de desechos orgánicos, seleccionados a partir de residuos generados en el entorno del estudio (hogar) y complementada con material obtenido de recauderías (en algunos lugares de provincia son conocidas como fruterías), mercados y tianguis locales. El material fue troceado en porciones medianas (de 5 a 7 cm) (Fig. 22) para facilitar su descomposición. Esta estrategia logró una materia orgánica inicial heterogénea y pertinente para la gestión de RSU. La mezcla homogeneizada se cargó en el compostador automatizado al inicio de cada ciclo.



Fig. 22. Material inicial, cortado en trozos para su mejor descomposición.

Sistema de Monitoreo y Parámetros de Control

La evaluación se centró en el monitoreo continuo de parámetros críticos y en la respuesta automatizada del sistema para el registro simultáneo de la humedad y temperatura interna del material con un sensor AM2305. La temperatura se consideró como el indicador primario de la actividad microbiana y la evolución de las fases del proceso. La frecuencia de muestreo se ajustó a intervalos de 180 y 120 minutos para los ciclos de experimentación 1 y 2, respectivamente, bajando hasta 10 minutos para el tercer ciclo. De forma paralela, un sensor DHT11 monitorizó la temperatura y la humedad ambiente en la proximidad inmediata del equipo. Este monitoreo ambiental permitió calcular diferenciales térmicos (indicadores de la intensidad de la actividad microbiana) y contextualizar las variaciones internas.

Lógica de Control

El sistema de control tiene como objetivo monitorear la temperatura interna dentro del rango termófilo de 45 °C a 75 °C, adecuado para la higienización del material. La humedad interna se registró con el fin de identificar condiciones críticas (un nivel inferior al 40% inhibe la actividad biológica, mientras que superar el 60% puede inducir anaerobiosis). Si bien el sistema no cuenta con un mecanismo de humidificación automática, la aireación y rotación del cilindro constituyeron la principal acción de control. No se programó una activación periódica fija; la intervención responde exclusivamente a la lógica de control térmico dependiente de la etapa en que se encuentre la mezcla.

Evaluación del Proceso y Criterios de Finalización

El progreso y los resultados se evaluaron mediante indicadores directos e indirectos. Primero, se registró el tiempo total de procesamiento, desde la carga inicial hasta la obtención de un producto estabilizado (hasta la etapa de enfriamiento). La duración y transición de las fases (mesófila, termófila y enfriamiento) se delimitaron a partir del análisis de los perfiles térmicos continuos. Para cuantificar la eficiencia del proceso, se midió la reducción volumétrica (medida directa al inicio y al final de cada ciclo) y se determinó la pérdida de masa por pesaje directo, esta última como un indicador de la mineralización de la materia orgánica.

Y por último, el proceso se consideró concluido y el producto estabilizado al cumplirse un criterio combinado y objetivo. Primero, un descenso térmico sostenido, por encima de la temperatura ambiente durante un período mínimo de tres días consecutivos. Segundo, la verificación mediante evaluación organoléptica, donde la composta presentaba características de inicio de madurez: color

oscuro y ausencia de olores desagradables (Fig. 23). Este criterio dual permitió declarar el fin de cada ciclo experimental de manera consistente y reproducible.



Fig. 23. Características organolépticas perceptibles con principios de maduración. Se aprecia su color oscuro y ausencia de olores desagradables.

4.4.2. Ciclos de experimentación

Primer Ciclo Experimental (Invierno 2024 - Marzo 2025)

El primer ciclo experimental, fundamental para establecer la línea base del estudio, se inició formalmente durante el periodo invernal de 2024, abarcando desde la última semana de diciembre hasta las primeras semanas de marzo de 2025. Este calendario estacional fue escogido deliberadamente para permitir una documentación exhaustiva y precisa del comportamiento del proceso de compostaje bajo condiciones térmicas típicamente asociadas a esta estación, incluyendo temperaturas ambiente más bajas y una humedad relativa potencialmente mayor.

Para establecer una evaluación comparativa y determinar la eficiencia de la automatización frente al manejo pasivo, se implementaron dos sistemas en paralelo: el prototipo de compostador automatizado y un sistema tradicional de pila estática, que operó como grupo de control experimental. Ambos sistemas fueron instalados en un entorno semicontrolado dentro de un pequeño cuarto anexo de la vivienda. Esta ubicación, protegida de la precipitación, el viento y la radiación solar directa por una estructura de lámina (plastiteja), minimizó la influencia de variables meteorológicas externas, asegurando que las variaciones observadas fueran atribuibles a las diferencias metodológicas.

La carga inicial para ambos sistemas consistió en una masa total aproximada de 12.5 kg de residuos vegetales. La composición de la mezcla fue seleccionada para ser homogénea y representativa de los desechos orgánicos domésticos, estructurándose de la siguiente manera: residuos de frutas y hortalizas (70%, equivalente a 8.75 kg), restos de café (20%, 2.5 kg), material estructurante de poda y hojas secas (7%, 0.875 kg), y cáscaras de huevo trituradas (3%, 0.375 kg). A partir de las densidades de los componentes, se estimó un volumen inicial total de la mezcla de 27.23 L. Previo a la introducción en los compostadores, la materia prima fue troceada en porciones medianas de 5 a 7 cm, con el propósito de optimizar la homogeneización y la accesibilidad microbiana, facilitando así la descomposición inicial. La monitorización del proceso se efectuó mediante el sensor AM2305, enfocado en el registro continuo de la humedad y temperatura interna, con una frecuencia de muestreo ajustada a intervalos de 180 minutos (3 horas) para documentar la evolución de las fases de descomposición.

Durante esta fase inicial, se implementaron dos sistemas paralelos: el sistema de compostaje automatizado, que incorporaba sensores y mecanismos de control activos para optimizar variables clave como la aireación y la temperatura, y un sistema tradicional de pila estática (o pasiva), el cual sirvió como grupo de control experimental para establecer una comparación rigurosa y medir la eficiencia diferencial de la tecnología propuesta.

La ubicación de ambos sistemas fue seleccionada para minimizar la influencia de variables meteorológicas incontrolables, que pudieran distorsionar los resultados comparativos. Ambos fueron instalados dentro de un espacio semicontrolado de la vivienda: un pequeño cuarto anexo.

Este recinto poseía una estructura de lámina (plastiteja) y ofrecía una protección parcial, aunque significativa, contra las inclemencias directas del clima, como las precipitaciones intensas, el viento fuerte y la radiación solar directa. Esta configuración espacial permitió asegurar que las variaciones observadas en la descomposición y la maduración de la composta fueran predominantemente atribuibles a las diferencias entre los métodos (automatizado vs. tradicional) y a las condiciones térmicas invernales, más que a factores externos aleatorios. La minimización de estas variables externas fue crucial para la validez interna del diseño experimental.

La composición específica de esta mezcla inicial fue balanceada, con una predominancia clara de la fracción vegetal. La distribución aproximada por masa fue de 70% de residuos de frutas y hortalizas (equivalente a 8.75 kg) y 20% de restos de café (2.5 kg). La materia seca o estructurante la conformó un 7% de restos de poda y hojas secas (0.875 kg), y el porcentaje restante de 3% se atribuyó a cáscaras de huevo trituradas (0.375 kg).

Segundo Ciclo Experimental (Primavera 2025)

El segundo ensayo experimental se concibió con el propósito de trascender la evaluación inicial, enfocándose en la robustez, adaptabilidad y rendimiento a largo plazo de los sistemas de compostaje bajo condiciones ambientales significativamente más exigentes y representativas de un escenario real.

Si bien se mantuvo la replicación de las condiciones iniciales en cuanto a la composición específica y la cantidad total de la mezcla de materia orgánica, garantizando así una base de comparación homogénea con el primer ensayo, la modificación residió en la redefinición del entorno de producción. Ambos sistemas fueron deliberadamente trasladados desde un ambiente controlado a un espacio exterior no acondicionado, concretamente un patio trasero abierto, lo que implicó su completa exposición a las condiciones ambientales naturales y fluctuantes características de la región durante todo el periodo experimental.

Esta decisión respondió a la necesidad de evaluar la resiliencia de los sistemas ante variables climatológicas no controladas, incluyendo la variación térmica circadiana (oscilaciones de las variables biológicas en intervalos regulares de aproximadamente 24 horas), la exposición directa a la radiación solar, los niveles de humedad ambiental, los episodios de precipitación, y la posible influencia del viento. El objetivo principal de esta exposición fue simular escenarios reales y no idealizados de implementación, como los que se anticiparían en contextos de uso doméstico, comunitario o de pequeña escala agroecológica.

De esta forma, el estudio se orientó a determinar primero, la capacidad de los sistemas para preservar la eficiencia del proceso de descomposición (monitoreada mediante parámetros como la temperatura interna y la tasa de reducción de volumen) a pesar de las fluctuaciones térmicas externas, así como el impacto directo de las condiciones climáticas extremas (olas de calor o periodos de lluvia intensa) sobre la microbiología del proceso y la calidad final del producto final y por último, la necesidad o frecuencia de ajustes e intervenciones en el manejo (riego, aireación) inducida por las variables ambientales, lo cual proporciona información invaluable respecto a la practicidad y los requerimientos de mantenimiento para su escalabilidad a nivel de usuario final.

En general, este segundo ensayo sirvió como una prueba de campo, diseñada para examinar y confirmar la validez de los hallazgos iniciales del primer ensayo, pero desde una perspectiva que incorpora el realismo operativo y las condiciones ambientales.

Tercer Ciclo Experimental (Invierno 2025)

El diseño del tercer ciclo representa una evolución metodológica que trasciende la reiteración de pruebas previas, orientándose a la validación del sistema de control automatizado en su entorno de aplicación final doméstico sin la instalación del compostador tradicional al interior de la vivienda.

Mientras que los ciclos precedentes establecieron la viabilidad del desempeño del sistema en entornos estables o exteriores, el objetivo fundamental de esta nueva fase es evaluar la fiabilidad operativa sostenida y la capacidad de control adaptativo del prototipo al ser implementado en un entorno doméstico. Por consiguiente, se procura una validación que se centra en la realidad fenoménica del uso doméstico, consolidando la aplicabilidad tecnológica del compostador compacto para familias urbanas.

En este contexto, el tercer ciclo experimental ha sido conceptualizado como la prueba de validación operativa en entorno de uso real del sistema de compostaje automatizado. Su inicio estuvo programado para coincidir con la fase del período invernal, y la diferencia crítica con las pruebas anteriores radica en la ubicación del compostador con el sistema de control automatizado. Esta reubicación implica la confrontación directa con las condiciones del uso doméstico, incluyendo la gestión de olores en proximidad al usuario, las restricciones de espacio y la evaluación de la eficiencia energética y de control del proceso bajo las temperaturas y la humedad relativa propias de un entorno residencial durante el invierno.

Metodológicamente, el foco principal se centra en la validación empírica de la capacidad del sistema para mitigar el impacto de las bajas temperaturas ambientales sobre la dinámica interna del proceso biológico de la compostación. Es ampliamente reconocido que el descenso de la temperatura externa tiende a inhibir drásticamente la actividad microbiana termofílica, lo cual se traduce en una prolongación del tiempo de ciclo y un potencial detrimento de las características del producto final. Específicamente, se analiza la eficiencia con que el sistema automatizado gestiona la aireación mediante los medios giros, la mezcla mecánica y la regulación de la humedad para asegurar el mantenimiento sostenido de la fase termofílica.

Un criterio de éxito es que la temperatura interna del compostador se mantenga consistentemente por encima del umbral crítico (típicamente 55 °C), a pesar de la acelerada disipación térmica hacia el ambiente frío.

Las métricas son monitoreadas y documentadas, incluyendo la velocidad de degradación (determinada mediante el análisis de la reducción volumétrica y la evolución de parámetros clave como la humedad y temperatura), el tiempo total del ciclo (cuantificado en el número de días necesarios para alcanzar la fase de enfriamiento comparado con los ciclos previos), y la homogeneidad de la composta final. En este tercer ciclo de experimentación, se tomó lectura del pH a la mitad y al finalizar del ciclo, solo a manera de comparación y no como factor determinante del proceso.

Este tercer ciclo es importante, dado que sus condiciones durante todo el tiempo que estuvo en operación, posibilitan la consolidación de la aplicabilidad práctica del sistema automatizado. Dicha aplicación se evalúa en entornos domésticos urbanos, que se distinguen por una marcada estacionalidad y una notable variabilidad climática.

4.4.3. Residuos vegetales procesados durante los ciclos de experimentación

Durante el primer ciclo experimental (diciembre 2024 - marzo 2025) se procesaron aproximadamente 12.5 kg de residuos vegetales tanto en el compostador automatizado como en el tradicional.

La composición aproximada en ambos casos fue:

- 70% residuos de frutas y hortalizas (cáscaras, partes no comestibles) → 8.75 kg.
- 20% restos de café → 2.5 kg.
- 3% cáscaras de huevo trituradas → 0.375 kg.
- 7% restos de poda y hojas secas → 0.875 kg.

A partir de estos materiales y considerando las densidades típicas de cada componente en condiciones iniciales de compostaje, el volumen aproximado total de la mezcla al inicio del proceso fue de unos 27 litros (con una densidad media estimada de ~0.45 kg/L).

Densidades aproximadas

- Frutas/verduras trituradas: densidad típica ≈ 0.6 kg/L (muy húmedo y suelto)
- Restos de café (posos): densidad ≈ 0.3 kg/L (seco, pero si es café usado, húmedo ≈ 0.8 kg/L)
- Cáscaras de huevo trituradas: densidad ≈ 0.5 kg/L (ligero, hueco)
- Poda/hojas secas trituradas: densidad ≈ 0.1 kg/L (muy ligero, mucho volumen)

Este es un volumen calculado para las pruebas realizadas. El valor puede variar dependiendo de la humedad, el tamaño de las partículas y el grado de compactación de cada material al momento de la medición, ya que las densidades aparentes utilizadas son valores registrados en estas pruebas.

Volumetría para cada componente registrado

Con los datos analizados para cada componente, se determinaron los siguientes valores:

Frutas y verduras:

$$V_f = \frac{8.75kg}{0.6kg/L} \approx 14.58L$$

Restos de café (húmedo):

$$V_c = \frac{2.5kg}{0.8kg/L} \approx 3.15L$$

Cáscaras de huevo trituradas:

$$V_h = \frac{.375kg}{0.5kg/L} \approx 0.75L$$

Restos de poda y hojas secas:

$$V_p = \frac{8.75kg}{0.1kg/L} \approx 8.75L$$

A partir de esta información, se calculó el volumen inicial (previo a la introducción en el compostador).

$$V_{total} = (14.58 + 3.15 + 0.75 + 8.75) L \approx 27.23L$$

Para el segundo ciclo experimental (iniciado en abril 2025) se mantuvieron proporciones similares en la composición, con cantidades aproximadas de 13.1 kg de residuos vegetales tanto en el compostador automatizado como en el tradicional.

Prácticamente las variaciones en composición entre ciclos fueron nulas y principalmente asociadas a la estacionalidad de ciertos productos vegetales, factor que afectó de manera equivalente a ambos sistemas (automatizado y tradicional).

Para el tercer ciclo (diciembre de 2025), se procesaron 12 Kg de residuos vegetales con las siguientes proporciones (sólo se implementó el compostador automatizado):

- 86% residuos de frutas y hortalizas (cáscaras, partes no comestibles) → 10.32 kg.
- 5% restos de café → 0.60 kg.
- 2% cáscaras de huevo trituradas → 0.24 kg.
- 7% restos de poda y hojas secas → 0.84 kg.

La planificación para este tercer ciclo contempló iniciar el proceso con un volumen de aproximadamente 24 litros del compuesto a procesar. Este volumen inicial fue seleccionado basándose en la necesidad de asegurar una muestra representativa y lo suficientemente grande como para permitir la observación clara y la cuantificación precisa de los fenómenos y reacciones que se esperaban durante este periodo de prueba intensivo.

Se anticipó que la gestión de este volumen permitiría obtener resultados estadísticamente fiables y confirmar o refutar las hipótesis planteadas al inicio de la investigación. Para este tercer ciclo, se analizó la mezcla con la volumetría registrada en los dos ciclos anteriores.

La metodología de solución implementada se centró en la creación de un prototipo de compostador automatizado, cuya configuración física atiende directamente las restricciones espaciales de los entornos domésticos urbanos. El diseño adoptó una estructura de prisma octogonal rotatorio, cuyo objetivo fue maximizar la capacidad efectiva (estimada en 25 L de volumen útil) en una base de instalación reducida. La arquitectura de hardware se basó en la placa Arduino Uno R3 como unidad de procesamiento central, responsable de procesar los datos de los sensores e interactuar con el sistema de actuación electromecánica. El mecanismo de aireación y homogeneización se articuló mediante un motor NEMA 23 controlado por un driver DM556, acoplado a un sistema de correa dentada con una relación de reducción de 5:1. La monitorización interna de temperatura y humedad se confió al sensor DHT11.

Como conclusiones, se determina que el sistema de automatización se desarrolló para regular las variables críticas del proceso, especialmente la temperatura y la humedad, mediante la rotación programada del tambor. La lógica de control se centró en la fase termófila (45 °C a 75 °C), programando la rotación del compostador cada 5 horas para garantizar una disipación uniforme del calor y una oxigenación constante del sustrato. A nivel de software, se realizó una refactorización

integral para migrar de una arquitectura monolítica a un diseño modular basado en funciones. Esta reestructuración se implementó con la finalidad de incrementar la cohesión funcional, asegurar la robustez operativa y facilitar la escalabilidad futura del sistema de control.

Para la validación empírica, se estableció un protocolo experimental de cuatro ciclos que se llevaron a cabo en condiciones estacionales diversas (Invierno y Primavera). Dicho protocolo incluyó ensayos de desempeño comparativo frente a un sistema tradicional de pila estática, y un ciclo de prueba en condiciones de uso doméstico real. El monitoreo se aseguró mediante el registro continuo de los parámetros de proceso en una tarjeta MicroSD, con una frecuencia de muestreo que se refinó desde intervalos de 180 hasta 10 minutos, lo que permitió una documentación de alta resolución de la evolución temporal y la cinética de las etapas de compostaje.

Capítulo V

5. Resultados

5.1. Evolución temporal de temperatura

La fase mesófila representa el inicio del proceso de compostaje, caracterizada por la actividad de microorganismos mesófilos que comienzan a descomponer la materia orgánica y, como resultado, a elevar la temperatura de la pila. El análisis comparativo entre el compostador automatizado y el tradicional, a lo largo de las tres pruebas experimentales, reveló diferencias significativas en la duración y estabilidad de esta etapa inicial.

En la primera prueba, el compostador automatizado demostró una eficiencia superior al alcanzar el umbral de 45° C en tan solo 6 días. En contraste, el compostador tradicional requirió 9 días para completar la misma fase, lo que representa un incremento del 50% en el tiempo de procesamiento en comparación con el sistema automatizado. La evolución de la temperatura se esquematiza en la Fig. 24.

La tendencia se mantuvo en la segunda prueba, aunque con una ligera variación en los tiempos absolutos. El compostador automatizado completó la fase mesófila en 7 días, un día más que en la primera prueba, mientras que el compostador tradicional mantuvo su registro en 9 días (Fig. 25). Esta diferencia de 2 días se traduce en un 30% más de tiempo de espera en el sistema tradicional.

Finalmente, la tercera prueba de compostaje ratificó la eficiencia del sistema automatizado, que nuevamente logró alcanzar la temperatura crítica de 45° C en un periodo de 6 días, igualando el mejor resultado obtenido en la primera prueba.

Una de las ventajas observadas en el compostador automatizado fue la estabilidad térmica durante esta fase, atribuible a la implementación de giros periódicos y controlados, se facilitó una distribución homogénea del calor generado por la intensa actividad microbiana. Este volteo constante y programado previno la formación de zonas frías o sin descomponer y logró que el material alcanzara la temperatura necesaria de manera más uniforme, logrando así la cinética de reacción de los microorganismos mesófilos y, por consiguiente, acortando la duración total de la fase. Esta mayor estabilidad y uniformidad térmica son indicadores clave de un proceso de compostaje más robusto y eficiente en el sistema automatizado.

El análisis comparativo de la fase termófila (de 45–70° C) entre el compostador automatizado y el método tradicional reveló diferencias significativas en la eficiencia y consistencia del proceso. El compostador automatizado demostró resultados notables al alcanzar y superar los 60° C en un plazo de solo 7 días. Es importante destacar que esta temperatura elevada se mantuvo con picos sostenidos durante un periodo de 72 horas, estableciendo las condiciones adecuadas para una higienización del material, es decir, para la eliminación completa de patógenos y la inactivación de semillas de malezas.

En contraste, el compostador tradicional experimentó un retraso, logrando alcanzar esta temperatura crítica de 60° C a partir del día 8 o 9 después de haber concluido la etapa mesófila. Si bien se logró el umbral deseado, se observaron ligeras variaciones y una menor estabilidad térmica, lo cual podría atribuirse directamente a la falta de un sistema de aireación que permita una distribución uniforme del calor y el oxígeno.

La experimentación incluyó pruebas para evaluar la reproducibilidad del proceso. En la segunda prueba, si bien las condiciones de temperatura fueron ligeramente menores en ambos sistemas, la tendencia general de desempeño y la diferencia entre ambos métodos se mantuvieron similares a la primera. No obstante, la tercera prueba mostró un resultado particular en el compostador automatizado, donde la temperatura de 63° C se alcanzó incluso más rápido, a los 7 días, superando ligeramente el pico máximo de la primera prueba en el mismo lapso de tiempo.

Esta variabilidad en el tiempo de alcance y el pico de temperatura entre las pruebas es atribuible a la exposición de ambos compostadores al clima externo y la temporada estacional del año en las pruebas 1 y 2. Las fluctuaciones en la temperatura ambiente, la humedad relativa y la precipitación afectaron la tasa de pérdida de calor y la actividad microbiana inicial, especialmente en el sistema tradicional.

Otro aspecto fundamental que subraya las ventajas del sistema automatizado es la consistencia. En el método tradicional, aunque la temperatura máxima llegó a fluctuar dentro de un rango aceptable (entre 50–65 °C), esta variación fue mayor y la consistencia temporal fue notablemente menor. La principal hipótesis para esta falta de uniformidad radica en la ausencia de una aireación constante y controlada. La aireación es importante para suministrar oxígeno a los microorganismos termófilos y para disipar el exceso de humedad, permitiendo que la actividad metabólica (y, por ende, la generación de calor) se mantenga en su punto máximo de manera sostenida. El sistema automatizado, al gestionar la aireación mediante los giros, logró mantener picos de temperatura más

estables y por períodos más prolongados, asegurando una descomposición más rápida y una mejor calidad higiénica del producto final.

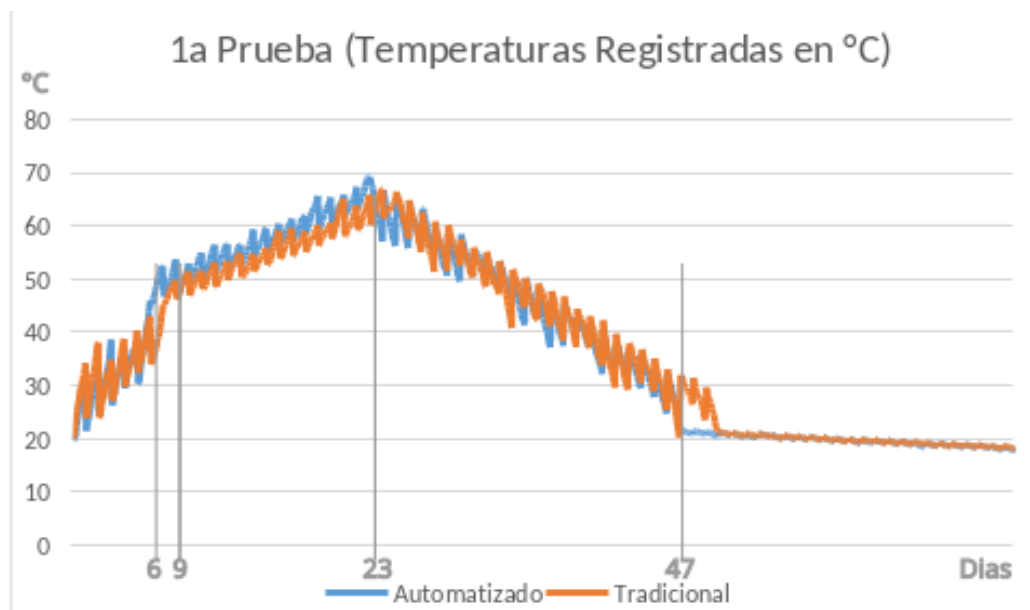


Fig. 24. Evolución de la temperatura durante la primera prueba llevada a cabo en invierno de 2024 con registros cada 3 horas.

Fase de enfriamiento: El compostador automatizado registró un descenso gradual a temperatura ambiente en 24 días, frente a los 27 días del método tradicional en la primera prueba. Mientras que en la segunda se observó una ligera variación a la alta, ya que las condiciones térmicas climáticas fueron ligeramente superiores que en la primera prueba (Primavera contra Invierno).

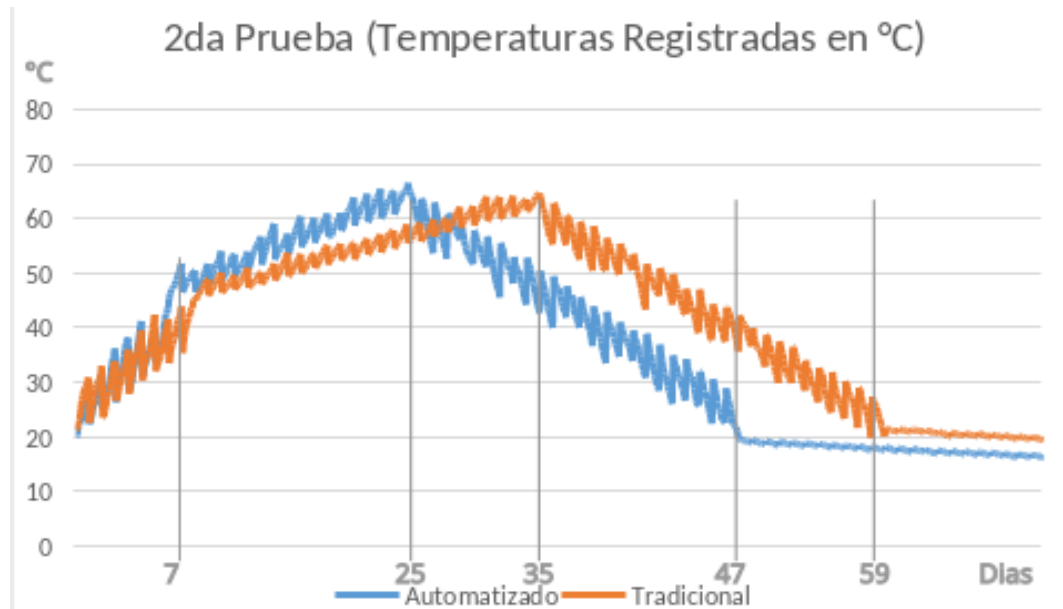


Fig. 25. Evolución de la temperatura durante la segunda prueba llevada a cabo en primavera de 2025 con registros cada 2 horas.

En las Fig. 24 y 25 se representa la evolución de las temperaturas monitoreadas tanto en el compostador automatizado (azul) y el compostador tradicional (naranja). En la primera prueba se observa una ligera alza en el compostador automatizado, mientras que en la segunda prueba se observa un lapso mayor de tiempo en el compostador tradicional para alcanzar la temperatura máxima registrada. Dicha observación puede deberse a que el sistema automatizado mejora las condiciones iniciales para el proceso de compostaje (respecto a la humedad o la aireación), acelerando así el inicio de la fase mesofílica.

La Fig. 26 muestra detalladamente la variación de temperatura registrada durante la tercera prueba experimental. Es menester señalar que esta medición se llevó a cabo dentro de un área específica del domicilio particular, la cual se caracterizaba por estar en una zona semi ventilada, permitiendo una interacción con las condiciones ambientales circundantes. Un aspecto fundamental y distintivo de este tercer ensayo es que la evaluación se centró exclusivamente en el desempeño y comportamiento del sistema de compostaje automatizado. A diferencia de pruebas anteriores, en esta ocasión se omitió la inclusión del compostador tradicional, con el objetivo de estudiar únicamente la eficiencia térmica y el patrón de variación de la temperatura generada por el prototipo automatizado bajo condiciones domésticas reales.

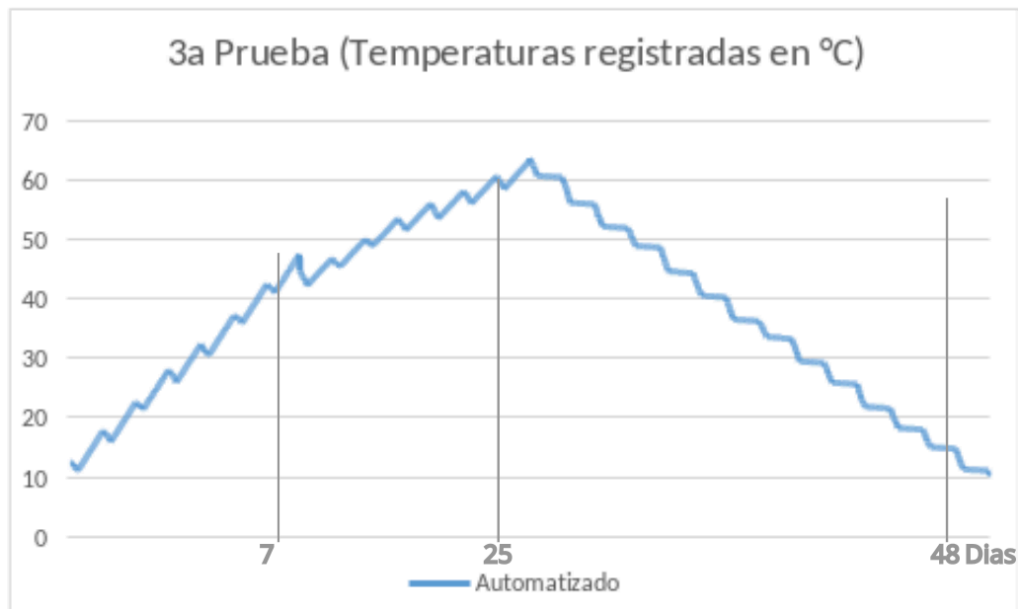


Fig. 26. Evolución de la temperatura durante la tercera prueba llevada a cabo en invierno de 2025 con registros cada 15 minutos.

5.2. Duración temporal por etapas

El análisis temporal de las cinéticas de reacción durante el proceso de compostaje reveló una mejora operativa consistente en el sistema automatizado en comparación con el método tradicional, lo que se tradujo en una reducción significativa del tiempo total de procesamiento. La monitorización constante de las variables clave en cada etapa demostró una disparidad notable en la duración de las fases, lo cual es un indicador directo del impacto de la tecnología en la optimización biológica y termoquímica del proceso.

El sistema automatizado demostró ventaja de manera más evidente durante la fase mesófila, un periodo marcado por la rápida activación de la población microbiana y la descomposición inicial de los compuestos solubles. Este demostró una capacidad de activación mayor y una reproducibilidad, logrando la conclusión de la fase en un periodo que osciló consistentemente entre seis y siete días. Específicamente, en las pruebas experimentales primera y tercera, la duración se mantuvo en seis días, un control adecuado de las condiciones que sugieren la actividad microbiana temprana. Una ligera variación a siete días en la segunda prueba se considera mínima y puede atribuirse a las sutiles

heterogeneidades inherentes al material orgánico o a fluctuaciones menores en las condiciones ambientales del recinto.

El método tradicional requirió un periodo significativamente más prolongado para alcanzar la estabilidad biológica y culminar esta etapa. La duración se mantuvo uniformemente en nueve días a lo largo de las pruebas. Esta diferencia de dos a tres días resalta la limitación del método tradicional para gestionar de manera precisa los factores críticos como la aireación y la mezcla, cuya optimización en el sistema automatizado acelera significativamente la actividad metabólica inicial y, por ende, la cinética de la fase.

La fase termófila, también evidenció un rendimiento mayor. Este sistema no solo fue capaz de alcanzar las temperaturas críticas (superiores a 55° C), sino que, además, demostró ser más eficaz para mantenerlas a lo largo del periodo encontrado en la documentación consultada. En la primera prueba, las temperaturas de higienización se mantuvieron activas durante setenta y dos horas continuas, lo que constituye un indicador directo del control dinámico de la aireación y la humedad para sostener el calor metabólico.

Por el contrario, el método tradicional se caracterizó por un patrón de calentamiento más lento e inestable. Se observó un periodo de latencia más extenso antes de que la pila de compost alcanzara el umbral crítico de temperatura. El registro experimental indica que el inicio efectivo de la fase de higienización se retrasó hasta el octavo o noveno día posterior a la culminación de la etapa mesófila. Esta demora conlleva un riesgo potencial para la uniformidad de la higienización del volumen completo del material y prolonga innecesariamente el ciclo de procesamiento, afectando negativamente la productividad.

Finalmente, la etapa de enfriamiento y maduración, donde se produce la estabilización de la actividad microbiana y el descenso gradual de la temperatura hasta alcanzar la ambiental, también se completó con una mayor celeridad en el sistema automatizado. El sistema automatizado demostró una finalización más expedita, registrando un descenso completo a temperatura ambiente en tan solo veinticuatro días para la primera prueba.

En contraposición, el método tradicional necesitó un periodo de veintisiete días para lograr la misma estabilización térmica. Aunque la diferencia de tres días en esta fase pueda parecer marginal, su acumulación a lo largo del ciclo total de compostaje confirma que la capacidad del sistema automatizado para gestionar la ventilación y la disipación del calor residual de manera controlada contribuye a una finalización más eficiente y rápida del proceso integral. El análisis de los resultados

estudiados, mostró que un control de las variables en el sistema automatizado se traduce en una reducción significativa del tiempo total de procesamiento, lo que mejora la productividad sin comprometer la producción de composta final.

5.3. Tiempo total requerido por ciclo

El análisis de los resultados experimentales confirma la eficiencia operativa del sistema de compostaje automatizado. La gestión activa de las variables operativas críticas del proceso (específicamente la humedad, la temperatura y la aireación mediante la programación de giros) indujo una merma sustancial en el tiempo total requerido para la transformación de la materia orgánica. Este efecto se manifestó en una reducción notable de la duración del ciclo de producción completo.

Las Fig. 27, 28 y 29 (correspondientes a la primera, segunda y tercera prueba, respectivamente) muestran claramente una disminución temporal en cada una de las etapas del proceso de compostaje. Es importante destacar que, mientras en las pruebas 1 y 2 se comparó el desempeño con un compostador tradicional, la tercera prueba se realizó utilizando exclusivamente el compostador automatizado propuesto en este trabajo de investigación.

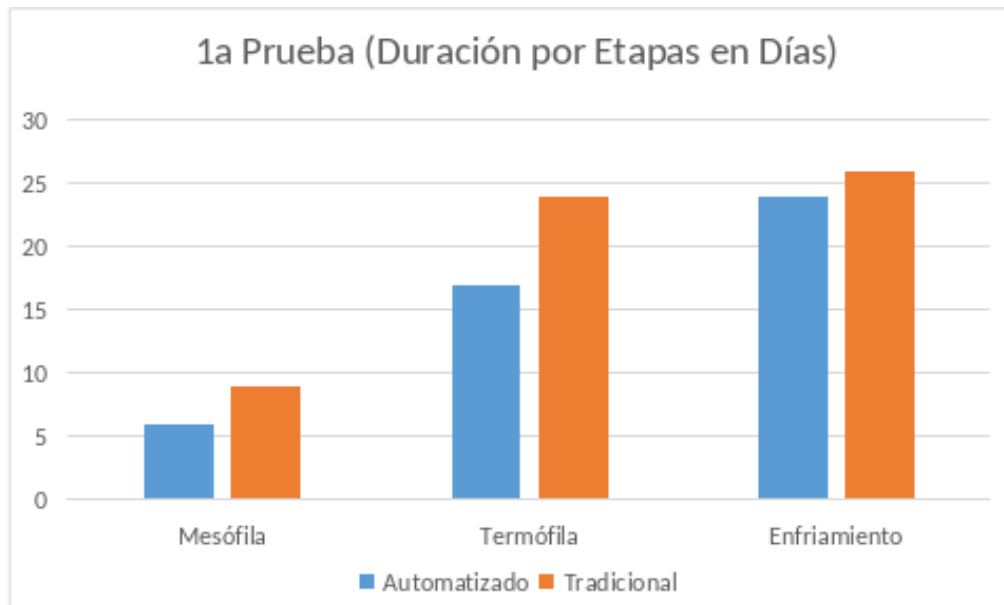


Fig. 27. Comportamiento de las etapas para la 1a Prueba.

En términos de cinética de reacción, se observó que la fase mesófila en el sistema automatizado alcanzó una rápida activación, con una duración consistente de seis a siete días, lo que representa una aceleración significativa en comparación con los nueve días uniformes que demandó el método tradicional. Esta ventaja se extendió a la fase termófila, donde el sistema automatizado fue capaz de sostener las temperaturas críticas durante setenta y dos horas en una de las pruebas, y de alcanzar el pico máximo de temperatura a los siete días en otra. El método tradicional, por su parte, manifestó una respuesta más lenta, al alcanzar el umbral térmico elevado únicamente a partir del octavo o noveno día posterior a la conclusión de la etapa mesófila. Además, el sistema automatizado acortó la etapa de enfriamiento, completando el descenso a temperatura ambiente en veinticuatro días, en contraste con los veintisiete días registrados en el proceso convencional.

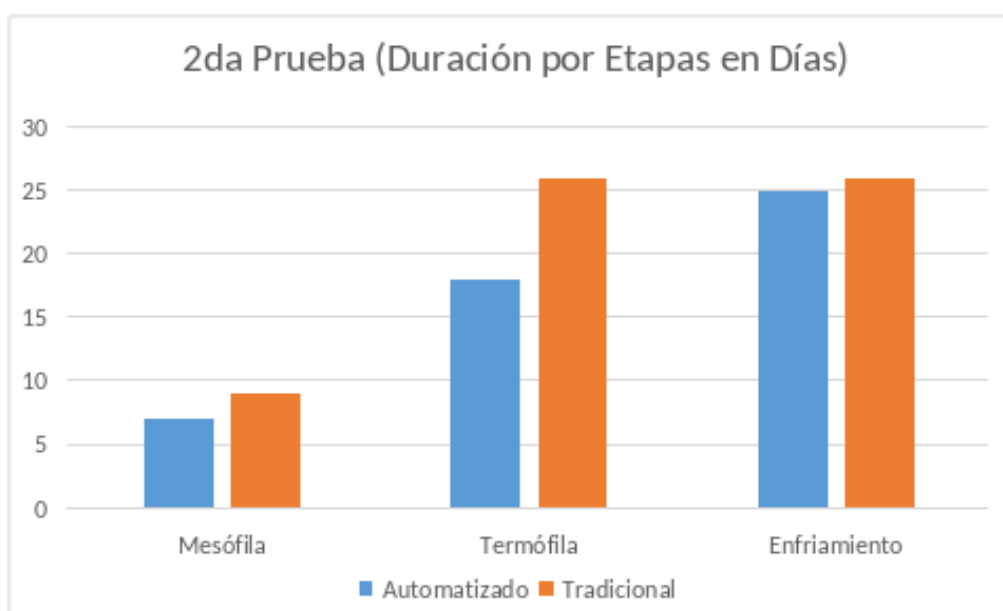


Fig. 28 Comportamiento de las etapas para la 2a Prueba.

Esta optimización temporal en las fases individuales no constituyó un beneficio aislado, sino que generó un efecto sinérgico que potenció la productividad global del proceso de compostaje. La capacidad de procesar lotes con mayor celeridad se tradujo en una conclusión más expedita y eficiente del proceso integral. Es relevante destacar que esta aceleración se llevó a cabo sin menoscabo de la calidad del producto final. Los parámetros resultantes, como la madurez, la estabilidad y la ausencia de agentes patógenos, ratifican que el incremento en la velocidad de procesamiento no comprometió la composta obtenida, sino que, por el contrario, su calidad fue reforzada mediante el control y la estabilidad proporcionados por el sistema biológico automatizado.

En esencia, la implementación de la automatización y la optimización paramétrica logra una convergencia entre la eficiencia temporal y la calidad del producto.

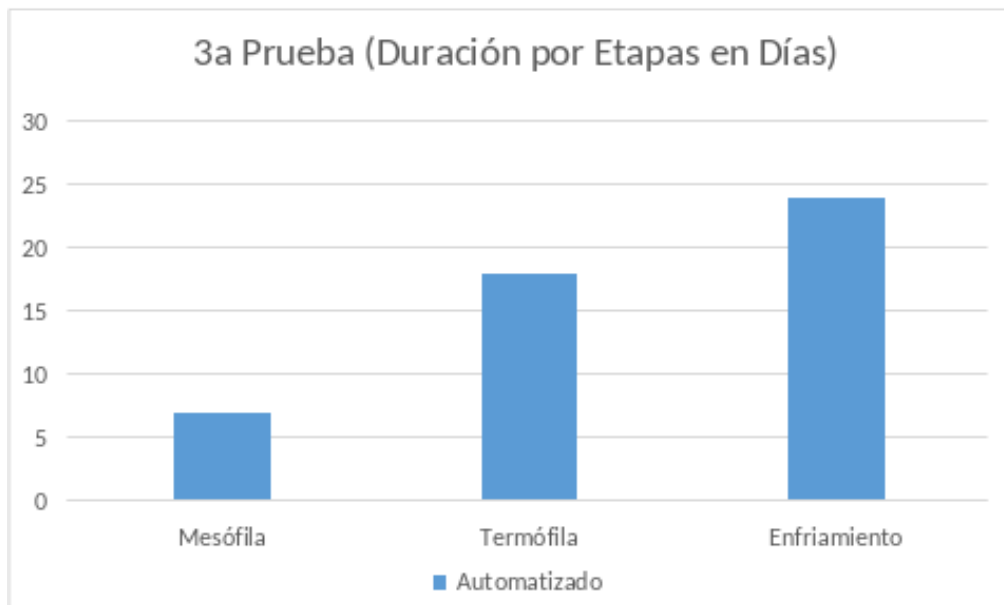


Fig. 29. Comportamiento de las etapas para la 3a Prueba.

5.4. Reducción de Volumen

La comparativa entre la reducción de volumen obtenida en el compostador automatizado y el método tradicional se aborda desde la perspectiva de la eficiencia espacial y temporal requerida para el procesamiento de los residuos orgánicos, constituyendo la justificación central del diseño propuesto.

La conceptualización del compostador automatizado responde directamente a las limitaciones que presentan los sistemas tradicionales en entornos urbanos con espacios reducidos. En contraste con el requerimiento de grandes superficies para la instalación y operación de compostadores convencionales, el diseño propuesto de tipo tómbola con forma de prisma octogonal busca alcanzar el volumen útil del sistema en un espacio reducido. Esta característica le permite adaptarse a entornos confinados como balcones o terrazas, superando una barrera de implementación crítica para el método tradicional.

Adicionalmente, si bien los datos cuantitativos comparativos se encuentran en las secciones arriba mencionadas, la justificación establece que la automatización incide en el factor temporal. La

optimización de las condiciones del proceso (humedad y temperatura) mediante la automatización permite reducir los tiempos de procesamiento en comparación con los métodos manuales, cuya duración prolongada resulta poco práctica para usuarios urbanos. Esta aceleración del ciclo se traduce en la posibilidad de procesar nuevo material orgánico con mayor frecuencia, maximizando la capacidad efectiva de gestión de volumen de residuos domésticos en el tiempo y en un espacio reducido.

A nivel de impacto general, el contexto de la investigación subraya que la práctica del compostaje doméstico en zonas urbanas puede lograr una reducción significativa de residuos orgánicos, llegando a una producción del 80% al 90% menor de la materia orgánica compostable de los desechos enviados a los rellenos sanitarios, un objetivo al cual el sistema automatizado contribuye con una solución tecnológica para su adopción en entornos compactos.

5.5. Evaluación del producto final

El análisis de los resultados y del producto final revela que la composta obtenida con el compostador automatizado propuesto posee características favorables y coherentes con los criterios de madurez establecidos para productos de compostaje. Los estudios analizados coinciden en que la automatización del proceso, apoyada en el monitoreo y control de variables críticas como temperatura, humedad, pH y aireación, contribuye de manera directa a la estabilidad y homogeneidad del material final. Esta regulación favorece una degradación más completa de la materia orgánica, lo que se traduce en un compost con mejor grado de madurez y menor presencia de compuestos fitotóxicos.

La Fig. 28 proporciona una indicación visual de que el proceso de degradación biológica del material no había alcanzado su estado de finalización completa, un fenómeno que se manifestaba de manera más notoria y persistente en las secciones superiores de la muestra. Esta incompleta descomposición se interpreta como una consecuencia directa de la dinámica ambiental y microbiana dentro del sistema de estudio.

Específicamente, la atribución principal de este estado de degradación parcial recae en una exposición significativamente reducida de las áreas superiores a la acción de los microorganismos responsables del proceso de descomposición. Esta limitación en la exposición puede deberse a varios factores interrelacionados como la diferencia en la humedad y aireación, ya que las capas superiores suelen estar más sujetas a la desecación y a variaciones más rápidas de temperatura,

condiciones que pueden inhibir la actividad metabólica óptima de ciertas comunidades microbianas, particularmente las que prosperan en ambientes más húmedos y anaeróbicos o microaerófilicos que pueden predominar en las capas inferiores.

Además una limitación en la migración microbiana, debido a la colonización y penetración de los microorganismos desde el medio circundante o desde otras capas puede haber sido menos eficiente o más lenta en la parte superior, lo que restringe el inóculo biológico disponible para iniciar y mantener la descomposición.

La Fig. 30 subraya una heterogeneidad en el grado de descomposición a lo largo del perfil de la muestra, siendo las secciones superiores las menos afectadas por la actividad microbiana debido a factores ambientales o de accesibilidad que limitaron el contacto efectivo y prolongado con los agentes biológicos de la degradación. Este hallazgo es importante para comprender la cinética del proceso y las variables que lo controlan en el sistema específico bajo observación.



Fig. 30 Se visualiza una conclusión clave del experimento, debido a las limitaciones en la cinética del proceso en el compostador tradicional.

Desde una perspectiva organoléptica y cualitativa, la composta producida muestra indicios de poseer una relación carbono/nitrógeno balanceada y aparentes concentraciones adecuadas de nutrientes esenciales mencionados en la literatura consultada, sugiriendo un material con potencial como enmienda orgánica para suelos urbanos. Asimismo, la estabilidad térmica evidenciada durante la fase

termófila, controlada automáticamente, indica higienización del compost, lo que se traduce en una presunta reducción de patógenos y semillas viables, incrementando su seguridad percibida para aplicaciones domésticas y productivas.

No obstante, la documentación consultada advierte que la composición del sustrato de entrada continúa siendo un factor determinante para el correcto desarrollo del proceso, incluso en sistemas automatizados. En particular, diversos autores señalan que la incorporación de residuos cítricos en proporciones elevadas puede afectar negativamente la dinámica del compostaje, debido a su alta acidez y a la presencia de compuestos antimicrobianos naturales. Estas características pueden inhibir la actividad microbiana, alterar el equilibrio del pH y, en consecuencia, estropear el proceso al ralentizar la descomposición de la materia orgánica o comprometer la calidad de la composta final.

La Fig. 31 muestra el producto final resultante del proceso en el compostador automatizado. Se observa una degradación significativa de todos los componentes de la materia orgánica inicial. Solo se distinguen de forma muy leve restos más sólidos, como pequeñas ramas, debido a la mayor dificultad para lograr su degradación completa.



Fig. 31. El producto final obtenido muestra una mayor uniformidad, resultado de las rotaciones del compostador y la consecuente homogeneización lograda al activar estos movimientos.

En términos microbiológicos, el control continuo de las condiciones operativas promueve el desarrollo de comunidades microbianas beneficiosas, responsables de la mineralización eficiente de la materia

orgánica. Esta dinámica microbiana controlada se refleja en un compost con estabilidad biológica y menor probabilidad de generar olores desagradables durante su uso o almacenamiento, aspecto especialmente relevante en contextos urbanos y domésticos. De este modo, la automatización no sólo acelera el proceso, sino que también mejora la calidad integral del producto final, siempre que se mantenga una adecuada selección y balance de los residuos orgánicos incorporados.

5.6. Comparativa con método tradicional

La comparación entre el compostador automatizado y el sistema tradicional demuestra que el primero ofrece ventajas significativas en términos de operación y viabilidad, especialmente para la gestión de residuos orgánicos a nivel doméstico.

La implementación del compostaje en viviendas urbanas enfrenta obstáculos estructurales, ya que el método tradicional es poco práctico debido a las limitaciones de espacio físico, la dificultad en el manejo de olores y el tiempo considerable que exige. La presente investigación se justifica, por tanto, en la necesidad de desarrollar una respuesta tecnológica que supere estas restricciones. El sistema automatizado propuesto aborda directamente estas problemáticas al ofrecer una solución compacta y eficiente para la revalorización de residuos orgánicos domésticos. El objetivo primordial de esta tesis se centra en el diseño e implementación de un sistema que logre una reducción sustancial en el tiempo total de procesamiento de residuos vegetales, solventando de esta forma la principal limitación del proceso convencional.

El análisis de los datos arrojados durante el proceso de experimentación valida la eficiencia operativa del compostador automatizado. Durante la fase mesófila, el sistema automatizado demostró una rápida activación, con una duración consistente de seis a siete días, lo cual representa una aceleración significativa frente a los nueve días requeridos uniformemente por el método tradicional. Esta ventaja se extiende a la fase termófila; el sistema automatizado sostuvo las temperaturas críticas por un período de setenta y dos horas en una de las pruebas y alcanzó el pico máximo de temperatura a los siete días en otra.

En contraste, el método tradicional manifestó una respuesta más lenta, alcanzando el umbral térmico elevado a partir del octavo o noveno día posterior a la finalización de la etapa mesófila. Finalmente, el sistema automatizado también acortó la etapa de enfriamiento durante las 3 pruebas realizadas, completando el descenso a temperatura ambiente en veinticuatro días, frente a los veintisiete días que se observaron en el proceso convencional. En consecuencia, esta optimización en las fases

individuales resultó en una reducción significativa del tiempo total requerido por ciclo, impactando positivamente en la eficiencia y productividad del proceso.

Como conclusiones del capítulo, se determina que el análisis experimental valida la eficacia operativa del sistema de compostaje automatizado propuesto en la tesis, confirmando una optimización en la cinética del proceso biológico en comparación con el método tradicional. La gestión dinámica de variables críticas, tales como la aireación, la temperatura y la humedad, resultó en una reducción en el tiempo de procesamiento requerido para la estabilización del material orgánico. En la fase mesófila, el sistema automatizado concluyó la etapa en un periodo de seis a siete días, alcanzando el umbral de 46°C. Esta duración implica una aceleración de cerca del 45% respecto a los nueve días requeridos uniformemente por el método tradicional.

El desempeño térmico en la fase termófila demostró un rendimiento adecuado en el sistema automatizado propuesto. Este no solo alcanzó las temperaturas de higienización (superiores a 55°C) antes que el tradicional, sino que también mantuvo picos sostenidos durante setenta y dos horas continuas. Esta estabilidad térmica, derivada de la rotación electromecánica controlada, asegura una distribución uniforme del calor y el oxígeno en el sustrato, lo cual es un indicador de la presunta inactivación efectiva de agentes patógenos y semillas viables. En contraste, el método tradicional manifestó una respuesta térmica menos rápida, logrando el umbral crítico sólo a partir del octavo o noveno día posterior a la etapa mesófila.

La optimización del ciclo se mantuvo hasta la etapa final. La fase de enfriamiento se completó en el sistema automatizado en 25 días, en comparación con los veintisiete días registrados en el proceso convencional. De forma paralela, el efecto de la rotación mecánica resultó en una mayor uniformidad del producto final obtenido. Los hallazgos confirman la aplicabilidad del diseño compacto tipo tómbola para entornos domésticos urbanos, superando las limitaciones espaciales y operacionales inherentes al método tradicional para la revalorización de residuos orgánicos.

Capítulo VI

6. Análisis y Discusión

6.1. Interpretación de resultados

El análisis e interpretación de los resultados presentados en el Capítulo V representan el vínculo analítico que identifica los hallazgos experimentales con el marco teórico y la hipótesis principal de la investigación. Este análisis se centra en evaluar la eficacia del sistema de compostaje automatizado en la modulación de los parámetros críticos del proceso y, consecuentemente, en la optimización de su cinética de degradación.

La evolución temporal de la temperatura (Sección 5.1) y la duración de las etapas (Sección 5.2) representan una validación del control logrado con el sistema automatizado. El registro de las temperaturas evidenció una rápida y sostenida transición a la fase termófila (como se describe en 2.2.2), lo cual es crucial para la higienización de la composta y la degradación acelerada de la materia orgánica. La consecución y el mantenimiento de los rangos térmicos adecuados se deben en gran parte a la acción del sistema de rotación, permitiendo así una aireación constante en fases críticas (véase la Sección 4.3.3).

La homogeneización del sustrato, lograda mediante la rotación del compostador (Fig. 10), redujo la formación de gradientes de temperatura y humedad, asegurando un entorno microbiológico uniforme (2.4.8). Esta acción contrarresta una limitación inherente a los métodos estáticos (pilas o contenedores pasivos) donde se requiere volteo manual, lo que se traduce en una eficiencia térmica y mejor descomposición de la materia orgánica inicial.

El análisis del tiempo total requerido por ciclo (Sección 5.3) y la Comparativa con método tradicional (Sección 5.6) confirma la principal aportación tecnológica de la tesis. Al contrastar la duración de los ciclos experimentales con los tiempos prolongados (varios meses) característicos del compostaje doméstico tradicional (Fig. 2), se demuestra que la automatización y el control de variables permiten una reducción drástica y predecible del tiempo de procesamiento.

Esta aceleración no compromete la calidad final del producto, como lo indica la Evaluación del producto final (Sección 5.5). La optimización de los factores cinéticos, como la aireación constante y la temperatura termófila controlada, promueve una descomposición biológica más eficiente,

cumpliendo el objetivo de ofrecer una solución práctica para los entornos urbanos, donde el tiempo y el espacio son recursos limitados.

Aunado a ello, en la sección donde se trata acerca de la reducción de volumen (Sección 5.4) cuantificada al finalizar cada ciclo, es un indicador del grado de mineralización y estabilización de la materia orgánica, reforzando la eficiencia del sistema. Un compost final uniforme (Fig. 23) y con una alta reducción volumétrica sugiere una alta eficiencia en la conversión del residuo, lo cual es de gran valor para el usuario doméstico.

La valoración económica del sistema de compostaje automatizado se establece al contrastar el requerimiento de capital inicial con los beneficios financieros y de valorización de recursos que se generan. La principal restricción para su adopción generalizada en el contexto doméstico es el costo de implementación, que es superior al de las alternativas manuales, debido a la necesidad de integrar componentes electrónicos y actuadores específicos, como el sensor AM2305, el motor NEMA23 y la controladora DM556. Dicha inversión inicial se justifica, sin embargo, por la capacidad del sistema para generar ahorros significativos a una escala municipal, ya que la reducción en los volúmenes de residuos destinados a la disposición final puede alcanzar cifras anuales de entre 2.8 y 34.4 millones de pesos, mitigando los costos de recolección y transporte.

En el plano operativo, el compostaje mecanizado reduce los requerimientos de mano de obra en un 50%, manteniendo costos de operación anuales relativamente bajos. En lo que respecta al retorno directo por producto, el sistema permite obtener un fertilizante orgánico que puede reintegrarse en programas de mantenimiento de áreas verdes o agricultura urbana. Este producto, al ser de autoconsumo en el ámbito doméstico, materializa un valor al desviar eficientemente hasta el 90% de los residuos orgánicos del sistema de gestión municipal. Por tanto, la proposición económica se basa en la transición de un costo de disposición a un ahorro operativo y a la revalorización del residuo.

Los resultados experimentales validan la premisa de que un sistema de compostaje de uso doméstico puede ser optimizado significativamente mediante la instrumentación y el control automático. El diseño e implementación del compostador (Capítulo IV) demostró ser capaz de reducir las limitaciones operacionales y temporales que obstaculizan la adopción del compostaje descentralizado en zonas de alta densidad poblacional (Capítulo I). El sistema propuesto trasciende las barreras identificadas, ofreciendo un método compacto y de operación simplificada que promueve la revalorización de los residuos orgánicos en el contexto de la economía circular.

6.2. Limitaciones del estudio y oportunidades de mejora

La gestión y control de los procesos de compostaje, si bien ha incorporado tecnología, requiere una profundización investigativa. Es importante enfocar la documentación en el impacto a largo plazo de los sistemas automatizados en la calidad final del producto. Esta necesidad es particularmente debido a la heterogeneidad de las fuentes de material orgánico utilizadas como sustrato, cuya variación en composición y estructura física exige un protocolo de monitoreo y evaluación riguroso para asegurar la consistencia y la seguridad sanitaria del compost.

En este marco, se establece como recomendación metodológica fundamental el someter muestras representativas de la composta final a un análisis en laboratorios acreditados. El objetivo primordial de esta remisión es la cuantificación precisa de las propiedades agronómicas, lo cual constituye un paso esencial para determinar el valor real del material y su potencial de uso.

Dicho análisis deberá integrar la evaluación de parámetros críticos, incluyendo la determinación de la Relación Carbono/Nitrógeno (CN), que funge como indicador de la estabilidad biológica y la dinámica de mineralización del nitrógeno. Es igualmente indispensable obtener un perfil nutritivo exhaustivo que abarque la medición de macronutrientes primarios (NPK) y un espectro detallado de micronutrientes esenciales. Adicionalmente, la estabilidad y el grado de madurez biológica deben ser validados mediante pruebas específicas, como el índice de germinación y la tasa de respiración, asegurando que el material haya superado la fase fitotóxica. Todas las mediciones deben realizarse en estricto apego a las normativas técnicas nacionales vigentes que regulan la calidad e inocuidad de las enmiendas orgánicas.

Solo mediante esta validación será posible establecer de manera irrefutable su valor intrínseco, su viabilidad para una aplicación segura en contextos agrícolas, incluidos los sistemas de producción orgánica, y su potencial de uso a mayor escala, ofreciendo así una garantía verificable al consumidor.

En lo concerniente a la mejora específica del prototipo de compostador de uso doméstico, se identifican dos implementaciones de carácter imperativo. Primero, resulta esencial la incorporación de un panel de interfaz visual que permita al usuario conocer de forma clara la etapa de procesamiento del compostaje. Aunque la lógica y la circuitería electrónica subyacentes contemplan las funciones para la activación de indicadores de fase (LED específicos para las etapas mesófila, termófila y de enfriamiento), la fabricación de este panel de visualización y su conexión al hardware de señalización aún requieren ser completadas. Se ejemplifica un prototipo para este panel en la Fig. 32.



Fig. 32 Propuesta de panel para el compostador automatizado que indique la fase activa.

Segundo, es fundamental implementar una protección o encapsulamiento adecuado para los componentes electrónicos y los sensores expuestos. La fase de prueba operativa reveló un proceso de oxidación significativa en elementos cruciales debido a la exposición prolongada y directa a factores ambientales como la humedad, la precipitación pluvial y las fluctuaciones térmicas. Consecuentemente, la instalación de una carcasa o un sellado hermético es vital para asegurar la durabilidad, la fiabilidad operativa y la longevidad del sistema automatizado en el ambiente doméstico a largo plazo.

6.3. Aplicabilidad del sistema en entornos domésticos

6.3.1. Ventajas

La aplicabilidad del sistema de compostaje doméstico automatizado se fundamenta en un conjunto de ventajas sistémicas y operacionales que lo posicionan como una solución robusta y pertinente frente a desafíos de la gestión de residuos orgánicos en entornos urbanos de alta densidad.

El beneficio fundamental reside en la optimización de la cinética del proceso, evitando las ineficiencias inherentes a los métodos tradicionales. Mediante la instrumentación y el sistema de control diseñado (Capítulo IV), se logra una modulación de variables críticas, como la temperatura y la

aireación, lo que permite una transición rápida y sostenida a la fase termófila y, consecuentemente, una reducción en el tiempo total del ciclo de compostaje (Sección 5.3 y 5.6).

Esta aceleración, aborda directamente la restricción de espacio físico (viviendas de menos de 60m²) que históricamente ha limitado la adopción del compostaje en núcleos urbanos (Capítulo I). Asimismo, la automatización confiere una significativa simplicidad de manejo y elimina la necesidad de volteo manual y de una supervisión técnica constante, lo cual fomenta la participación ciudadana y la sostenibilidad a largo plazo. Finalmente, la implementación de esta tecnología robustece la dimensión de la economía circular al facilitar la desviación de entre el 80% y el 90% de los residuos orgánicos de los rellenos sanitarios, generando un impacto ambiental positivo y cuantificable en la mitigación de gases de efecto invernadero (Capítulo I), al tiempo que provee un producto final estabilizado y de valor para el autoconsumo.

6.3.2. Barreras

La implementación del sistema de compostaje de uso doméstico automatizado, a pesar de sus notables ventajas operacionales y ambientales, introduce un conjunto específico de barreras de índole técnica, económica y de usabilidad que deben ser consideradas para su escalabilidad y adopción masiva.

Una barrera principal radica en el costo inicial de adquisición e implementación. A diferencia de los métodos tradicionales de bajo o nulo costo, el sistema automatizado requiere la inversión en componentes electrónicos, sensores (como el AM2305) y actuadores (motor NEMA23 y controladora DM556), lo que eleva su precio de mercado y puede constituir un factor disuasorio para familias con recursos limitados.

En segundo lugar, existe una dependencia tecnológica y de mantenimiento especializado. La complejidad del sistema de control y la programación asociada (como se detalla en la Sección 4.3) implican que cualquier falla en los sensores o en los componentes electromecánicos demanda un conocimiento técnico para el diagnóstico y reparación, dificultando su mantenimiento autónomo por parte del usuario doméstico promedio.

Finalmente, aunque el sistema mitiga el problema de espacio, su limitación en cuanto a la capacidad de procesamiento volumétrico restringe su aplicabilidad a la fracción orgánica generada por una

unidad familiar, siendo posiblemente inviable para la gestión de residuos a una escala comunitaria o comercial, lo que implica una limitación intrínseca de su diseño compacto.

En la Fig. 33 se muestra un cuadro comparativo, organizado en 6 categorías temáticas para facilitar su contraste. La columna del prototipo de tesis aparece destacada en morado para identificarla visualmente con facilidad.

El prototipo es el único con automatización completa por fases y monitoreo simultáneo de temperatura y humedad. El GEME es su competidor más cercano en cuanto al producto final, pero sin control digital de variables. El KEEPEEZ y el PUREE son más bien deshidratadores que compostadores aeróbicos reales, lo que los posiciona en una categoría tecnológica inferior para los fines de una tesis sobre compostaje.

Característica	GEME / Kobold	PUREE	KEEPEEZ	Prototipo (tesis) — propuesto
TECNOLOGÍA Y PROCESO				
Tipo de proceso	Fermentación aeróbica (biotecnología microbiana)	Eléctrico (deshidratación / trituración)	Eléctrico (calor + trituración)	Compostaje aeróbico automatizado (rotación electromecánica)
Automatización	Parcial — sin volteo manual; alimentación libre	Básica — solo depósito manual	Parcial — ciclos programados; autolimpieza	Completa — Arduino controla giro, T° y humedad de forma autónoma
Monitoreo de variables	No especificado	No especificado	Básico — control de temperatura interno	Avanzado — T°, humedad, aireación y fases vía AM2305 + DHT11
CAPACIDAD Y RENDIMIENTO				
Capacidad	No especificada (uso continuo)	No especificada	1 galón (~4 L) / 5–6 días de residuos	20–30 L útil (volumen interno >70 L)
Reducción de volumen	Hasta 95 %	No especificado	Hasta 90 %	No cuantificado aún
Tiempo de proceso	Continuo (días a semanas)	No especificado	4 a 8 horas por ciclo	Mesófila: 6–7 días; Enfriamiento: 24 días (vs. 9 y 27 días en método tradicional)
PRODUCTO FINAL				
Tipo de producto	Compost orgánico real	Fertilizante (deshidratado)	Abono orgánico	Compost aeróbico (compostaje real)
Calidad del compost	Alta	Media — producto deshidratado, no fermentado	Media	Alta — proceso aeróbico con control de fases
DISEÑO Y USO DOMÉSTICO				
Diseño	Electrodoméstico de encimera	Recipiente de encimera	Compacto (14.5" × 13.6" × 19.9")	Prisma octogonal tipo tómbola (rotatorio)
Espacio requerido	Interior (cocina / despensa)	Interior (cocina)	Interior (cocina)	Balcón, terraza o espacio exterior
Control de olores	Sí — sin olores reportados	Sí — diseño orientado a cocina	Sí — filtro BioFilter con carbón activado	Relativo — proceso exterior; aireación controlada
Residuos aceptados	Todo tipo, incluyendo salados y ácidos	Residuos de alimentos en general	Frutas, verduras, pan, granos, pequeños productos animales, café, papel	Residuos orgánicos domésticos (conforme a proceso aeróbico)
ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD				
Consumo energético	No especificado	Eléctrico (no especificado)	0.11 kWh por ciclo	Motor paso a paso NEMA 23 (bajo consumo por giro)
Impacto ambiental	100–300 kg CO2 evitados / año	Reduce desperdicio alimentario	Reduce residuos hasta 90 %	Reduce residuos orgánicos; promueve compostaje real en entorno urbano
LIMITACIONES				
Puntos débiles	Precio elevado; disponibilidad limitada en algunos mercados	CRÍTICO: Poca durabilidad reportada; sin instrucciones claras ni garantía definida	Capacidad reducida (4 L); no es compostaje aeróbico real	Prototipo en desarrollo; capacidad media; requiere espacio exterior
Accesibilidad / costo	Alto costo	Bajo costo	Costo medio	Por definir — prototipo académico

Fig. 33 Cuadro comparativo de los compostadores mencionados en el documento actual de tesis.

Capítulo VII

7. Conclusiones

La investigación presentada ha logrado el cumplimiento de los objetivos establecidos, evidenciando la viabilidad de una solución tecnológica compacta y automatizada para la gestión descentralizada de residuos orgánicos.

El logro de los objetivos específicos proporcionó las bases metodológicas y tecnológicas para el proyecto. En primer lugar, se cumplió la necesidad de **Identificar las condiciones necesarias para producir compost** mediante la revisión de los parámetros críticos. Se identificaron los rangos óptimos de humedad (entre 40% y 60%) y temperatura (manteniendo la fase termófila entre 45 °C y 75 °C). Estos umbrales guiaron el diseño del sistema y los criterios de actuación del mecanismo de volteo. En segundo lugar, se validó la **Programación del bloque de automatización del compostador** al desarrollar una arquitectura de *software* modular sobre la placa Arduino Uno R3. Esta programación integró la lectura de sensores (AM2305 y DHT11), la lógica para la detección de las etapas del proceso (mesófila y termófila), la identificación del inicio de la fase de enfriamiento mediante el monitoreo de descenso térmico sostenido durante tres días, y la activación del mecanismo de rotación NEMA23/DM556 con frecuencias específicas para la aireación y homogeneización.

Tiempo total del ciclo: El sistema desarrollado, demostró la capacidad de disminuir el tiempo de procesamiento de residuos de un promedio de 70 días a un promedio de 50 días (por lote, hasta la fase de enfriamiento), lo que se traduce en una optimización aproximada del 30% en comparación con las técnicas convencionales. Mientras que la literatura menciona reducciones que pasan de los 90-210 días requeridos por métodos tradicionales a periodos de 40 a 60 días en sistemas automatizados. La evaluación del producto final, que resultó del sistema de compostaje que incorpora la automatización, sugiere unas características que son favorables y en coherencia con los criterios físicos observables de madurez para la composta (aspectos como la temperatura, el color y el olor del producto.)

El tercer objetivo específico, relativo al **Diseño de un compostador automatizado para gestionar eficientemente desechos vegetales en menor tiempo**, fue confirmado a partir de los resultados experimentales. El diseño físico de prisma octogonal tipo tómbola demostró ser una configuración espacialmente eficiente para entornos urbanos reducidos. Desde la perspectiva operativa, el sistema

automatizado indujo una mejora en la cinética de descomposición en comparación con el método tradicional. La fase mesófila se concluyó en un periodo de seis a siete días, en contraste con los nueve días requeridos por el sistema tradicional. Esta eficiencia se mantuvo durante la fase termófila, donde el control automatizado de la aireación mediante giros permitió que el sistema alcanzara y sostuviera las temperaturas críticas de higienización (superiores a 50 °C) de manera más estable, alcanzando picos en tan solo siete días y manteniendo temperaturas elevadas con periodos estables, como setenta y dos horas continuas en la primera prueba. Finalmente, la etapa de enfriamiento también se redujo, completándose en veinticuatro días en el sistema automatizado frente a los veintisiete días del método convencional.

El sistema propuesto fue concebido para modular activamente los fenómenos biológicos y físicos fundamentales que rigen la cinética de la degradación de la materia orgánica. La intervención sobre la actividad biológica se materializó de forma indirecta, al mantener las condiciones ambientales del sustrato dentro de los umbrales adecuados para la proliferación y función de las poblaciones microbianas. El parámetro principal de control fue la temperatura, monitoreada de manera continua por un sensor interno (AM2305) y regulada mediante la activación del mecanismo de rotación. Esta dinámica de actuación tiene el propósito dual de sostener el material orgánico dentro del rango termófilo (45 °C a 75 °C) para lograr la sanitización y, a su vez, de disipar el calor metabólico excesivo que podría inhibir la actividad microbiana.

Paralelamente, se gestionó la humedad del sustrato, que debía oscilar entre el 40% y el 60% para maximizar la eficiencia metabólica y prevenir la formación de zonas de anaerobiosis. Esta gestión hídrica y térmica se consolidó a través de la manipulación del fenómeno físico de aireación y homogeneización. Para ello, se implementó un sistema de rotación electromecánico automatizado (motor NEMA23 y controladora DM556), diseñado para ejecutar giros programados en la cámara octogonal. Este movimiento logró una renovación gaseosa constante y una exposición homogénea del sustrato, lo cual es benéfico para el suministro de oxígeno y para evitar la compactación. La frecuencia de estos movimientos electromecánicos fue adaptada a la fase del proceso, rotando cada tres horas en la etapa termófila y cada cinco horas en la de enfriamiento. Cabe precisar que, si bien otros fenómenos como la variación electroquímica (pH y conductividad) son relevantes para la madurez del compost, el diseño del prototipo se focalizó en el control térmico y la aireación, sin integrar mecanismos de actuación automática para la corrección de estos parámetros específicos.

Como conclusión general, el **Objetivo General** de eficientar la gestión de desechos vegetales mediante el control de parámetros para producir compost en menor tiempo en espacios reducidos, se logró de manera satisfactoria. Los resultados confirman que la implementación de la automatización

(sensores y rotación electromecánica) optimizó la actividad microbiana y superó la principal limitación del método manual: la inconsistencia operacional. La acumulación de las reducciones temporales en cada fase valida la aceleración del ciclo total de procesamiento. Adicionalmente, la composta obtenida presentó características organolépticas de inicio de madurez (color oscuro y ausencia de olores desagradables), confirmando que el incremento en la velocidad de procesamiento no comprometió la calidad del producto final. Por lo tanto, se valida el prototipo como una contribución tecnológica directa a la gestión sostenible y eficiente de residuos orgánicos en contextos domésticos urbanos.

7.1. Recomendaciones para futuras investigaciones

La implementación exitosa de un sistema de compostaje doméstico automatizado sienta las bases para una línea de investigación que puede expandir su robustez, alcance y aplicabilidad. Para consolidar esta solución tecnológica, se sugiere enfocar esfuerzos futuros en las siguientes áreas:

7.1.1. Profundización en el Control Fino de Variables Bioquímicas

Si bien el control de la temperatura y la humedad ha demostrado ser efectivo para optimizar la cinética del proceso, se recomienda integrar un monitoreo y control más específico para los parámetros químicos y biológicos. Investigaciones futuras deberían centrarse en incorporar sensores de pH y desarrollar metodologías que permitan la estimación o medición indirecta en tiempo real de la relación carbono/nitrógeno (CN) del sustrato. Un control activo sobre la relación CN permitiría una dosificación automatizada de aditivos (materiales secos o fuentes de nitrógeno), maximizando la actividad microbiana y garantizando la obtención de un producto final de calidad superior de manera más predecible.

7.1.2. Eficiencia Energética y Diseño Mecánico

La aplicabilidad a largo plazo de tecnologías domésticas está intrínsecamente ligada a su sostenibilidad operacional. Se propone realizar un análisis detallado de la eficiencia energética del sistema de rotación. Esto incluye la evaluación de diferentes perfiles de rotación (frecuencia, duración y ángulo de giro) para determinar el balance óptimo entre la homogeneización del sustrato, el aporte de aireación y el consumo energético mínimo del motor NEMA23. Asimismo, se sugiere investigar el impacto de la estructura física y los deflectores internos (Fig. 10) en la transferencia de calor y masa,

con el fin de explorar materiales alternativos más económicos o con mejores propiedades de aislamiento térmico, reduciendo la dependencia de componentes de sellado adicionales.

7.1.3. Escalabilidad y Adaptación a Contextos Diversos

El modelo actual, diseñado para uso familiar, puede servir como prototipo para explorar la viabilidad de sistemas automatizados a mayor escala. Se recomienda investigar la adaptación del sistema a contextos de compostaje comunitario o para el manejo de flujos de residuos orgánicos específicos (e.g., residuos de mercados o restaurantes). Esta extensión implicaría la reevaluación de los componentes de potencia y la lógica de control para manejar volúmenes superiores, manteniendo la eficiencia en la reducción del tiempo de ciclo. De igual forma, se sugiere realizar pruebas experimentales con diferentes composiciones de residuos orgánicos para validar la universalidad de la lógica de control implementada.

7.1.4. Validación de Largo Plazo y Evaluación de la Interfaz Humano-Máquina

Para fortalecer la robustez del sistema, es necesario llevar a cabo ciclos de experimentación con una duración extendida y bajo condiciones ambientales controladas, permitiendo una caracterización más exhaustiva de la durabilidad de los componentes y la variabilidad de los resultados a lo largo de las estaciones climáticas. Adicionalmente, se recomienda desarrollar una interfaz de usuario (UX) más intuitiva (posiblemente a través de una aplicación móvil o una interfaz web) para la visualización de los datos (Anexo B) y la interacción con el sistema de control, lo que facilitaría la adopción por parte de usuarios no técnicos y permitiría la recopilación de datos valiosos sobre su comportamiento en el ambiente doméstico real.

8. Referencias

- Agnolucci, M., Cristani, C., Battini, F., Palla, M., Cardelli, R., Saviozzi, A., & Nuti, M. (2013). Microbially-enhanced composting of olive mill solid waste (wet husk): Bacterial and fungal community dynamics at industrial pilot and farm level. *Bioresource Technology*.
- Aguilar, J. A., Arguello, C., & Ramírez Solís, N. del R. (2015). Manejo de residuos sólidos urbanos: Caso de estudio en Las Margaritas, Chiapas.
- Akyol, Ç., Ince, O., & Ince, B. (2019). Crop-based composting of lignocellulosic digestates: Focus on bacterial and fungal diversity. *Bioresource Technology*.
- Alanís Ramírez, C. I., Álvarez Arteaga, G., & Ávila Córdoba, L. Á. (2022). Modelo institucional con perspectiva de ciclo de vida para el tratamiento de residuos orgánicos.
- Albarracín Sánchez, D. M., Roa Parra, A. L., Solano Ortega, F., & Montañez Acevedo, G. (2018). Producción de abono orgánico mediante el compostaje aerotérmico de residuos de poda. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*.
- Araiza Aguilar, J. A., Moreno, J., Pérez, J., & Rojas-Valencia, M. (2017). Municipal solid waste management in a municipality of Chiapas, Mexico.
- Avendaño Barrera, J. R., Sánchez Torres, Y. E., & Velasco Alarcón, L. A. (2024). La tecnología y su impacto en la gestión de procesos y estrategias de automatización. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4).
- Barros Pastor, M. del S., & Tovar Rúa, D. C. (2023). Implementación del compostaje como estrategia sostenible para reducir la generación de residuos sólidos orgánicos en el Centro Educativo La Guajirita. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(5), 2597–2613.
- Belén Puyuelo. (2012). Estratègies per optimitzar el procés de compostatge: Desenvolupament d'un sistema de control de l'aeració i d'una nova metodologia per definir la relació de nutrients en termes de biodegradabilitat (Tesis doctoral). Universitat Autònoma de Barcelona.

- Benites-Bravo, P., Carhuaricra-Chaca, J., Soriano-Huaman, R., & Zarate-Pena, F. (2023). Compost generator that increases nutrients and accelerates degradation of organic wastes. En Proceedings of the 2nd International Conference on Mechanical Engineering and Power Engineering (MEPE 2023).
- Bustamante Sánchez, Y. (2014). Gestión de residuos sólidos biodegradables para el logro de la ecoeficiencia en la universidad. Gestión en el Tercer Milenio, 17(34).
- Cai, H., Feng, W., Dong, Y.-H., Ma, Z., Cao, H., Sun, J., & Zhang, B. (2020). Microbial community succession in industrial composting with livestock manure and peach branches and relations with environmental factors. Huanjing Kexue.
- Campos Pozuelo, E., & Elías Castells, X. (2009). Procesos biológicos: Digestión anaerobia y compostaje. Ediciones Díaz de Santos.
- Cao, G., Song, T., Shen, Y., Jin, Q., Feng, W., Fan, L., & Cai, W. (2019). Diversity of bacterial and fungal communities in wheat straw compost for *Agaricus bisporus* cultivation. HortScience.
- Carrera Muñoz, J. A. (2022). La gestión ambiental y residuos sólidos en la región La Libertad. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 6(4).
- Castañeda Delgado, G. A., & Escatel, A. A. P. (2015). La problemática del manejo de los residuos sólidos en seis municipios del sur de Zacatecas.
- Castillo Díaz, J. M. (2016). Repercusión de vermicompost agroindustriales en la biota del suelo y en la biodisponibilidad de plaguicidas.
- Castro-Hernández, F., Navarro-Flores, J. R., & Castro-Barquero, L. (2023). Adición de inóculos microbianos y condiciones optimizadas de elaboración en un compost comercial. Agronomía Costarricense.
- Chandra, P., Nain, L., Singh, S., & Kuhad, R. C. (2013). Assessment of bacterial diversity during composting of agricultural byproducts. BMC Microbiology.
- Chávez Porras, Á., & Rodríguez González, A. V. (2016). Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. Revista de la Academia de Ciencias, (4).

- Clavijo Cevallos, M. P., Cajas Cayo, I. E., Toral Moreno, M. S., & Moreno Carrillo, G. D. (2025). Sistema de gestión de residuos orgánicos en los mercados del cantón Saquisilí, Ecuador. *Journal of Law and Sustainable Development*, 13(1).
- Costa, A. R. S., Ximenes, T., Ximenes, A. F., & Beltrame, L. T. C. (2016). The process of composting and its potential in the recycling of organic waste.
- Da Silva, P., Siqueira, M. M. C., Rodrigues, V. K. F., Coelho da Silva, A. L., De Rezende, M. S. R., Dos Santos, V. G., & De Santana, B. F. M. (2023). Microorganismos en el compostaje y factores que interfieren durante el proceso.
- Defrieri, R., Jiménez, M. P., Effron, D., & Palma, M. (2015). Utilización de parámetros químicos y microbiológicos para la evaluación del proceso de compostaje. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(2), 123–130.
- Diniz, M. B., & Arraes, R. (1998). Avaliação econômica da geração e dos métodos de tratamento dos resíduos sólidos domésticos. *Revista Econômica do Nordeste*.
- Escobar, N., Delgado, J. M., & Romero Jola, N. J. (2012). Identificación de poblaciones microbianas en compost de residuos orgánicos de fincas cafeteras de Cundinamarca.
- Federici, E., Pepi, M., Esposito, A., Scargetta, S., Fidati, L., Gasperini, S., Cenci, G., & Altieri, R. (2011). Two-phase olive mill waste composting: Community dynamics and functional role of the resident microbiota. *Bioresource Technology*.
- Fernandes, F., Galvão de Souza, S., Nunes, C. W., Nogueira, R., & Izume, F. (2000). Automação para o controle da aeração em reator piloto para compostagem do lodo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 21(4), 89–96.
- García Dávila, J. A., Santacruz Juarez, E., Sánchez Minutti, L., Ortega Sánchez, E., & Tellez Giron, J. D. (2024). Evaluación de propiedades fisicoquímicas de composta como producto de un dispositivo inteligente de degradación biológica. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 14(28).

- Giraldo Murcia, J. A., Angel Gasca, R. D., Pérez Castrillón, L. E., & Mosquera Rivera, L. C. (2021). Evaluación de los parámetros de control del compostaje (oxigenación y relación C/N). *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 3(2), 41–51.
- Gómez-Brandón, M., Lazcano, C., & Domínguez, J. (2008). The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure. *Chemosphere*.
- He, Y., Xie, K., Xu, P., Huang, X., Gu, W., Zhang, F., & Tang, S. (2013). Evolution of microbial community diversity and enzymatic activity during composting. *Research in Microbiology*.
- Hernández-Lara, A., Ros, M., Cuartero, J., Bustamante, M., Moral, R., Andreu-Rodríguez, F. J., et al. (2022). Bacterial and fungal community dynamics during agro-industrial waste composting. *Science of the Total Environment*.
- Ji, Z., Zhang, L., Liu, Y., Li, X., & Li, Z. (2023). Evaluation of composting parameters, technologies and maturity indexes. *Science of the Total Environment*.
- López, M. J., Jurado, M., López-González, J. A., Estrella-González, M. J., Martínez-Gallardo, M. R., Toribio, A., & Suárez-Estrella, F. (2021). Characterization of thermophilic lignocellulolytic microorganisms in composting. *Frontiers in Microbiology*.
- Mena Espino, X., Mena Espino, M. E., & Tavera Cortés, M. E. (2017). Enzimas y organismos importantes dentro del proceso de compostaje.
- Nemet, F., Perić, K., & Lončarić, Z. (2019). Microbiological activities in the composting process. *Journal of Environmental Management*, 239, 304–312.
- Salazar Arce, T. N. (2016). Actividad microbiana en el proceso de compostaje aerobio de residuos sólidos orgánicos.
- Sánchez, Ó., Ospina, D., & Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process.
- Tola Garfias, D. N., López Mamani, M. A., & Limachi Ledezma, I. M. (2024). Dinámica de propiedades físicas y químicas del proceso de compostaje con diferentes dosis de microorganismos eficientes.

- Vázquez Castro, E. R., & Millones Chanamé, C. E. (2021). Una revisión sobre la diversidad microbiana y su rol en el compostaje aerobio.
- Villegas-Cornelio, V. M., & Canepa, J. R. L. (2017). Vermicompostaje: Avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos.
- Zhang, J., Zeng, G., Chen, Y., Yu, M., Yu, Z., Li, H., Yu, Y., & Huang, H. (2011). Effects of physico-chemical parameters on the bacterial and fungal communities during agricultural waste composting. *Bioresource Technology*.
- Zhao, X., Li, J., Che, Z., & Xue, L. (2022). Succession of the bacterial communities and functional characteristics in sheep manure composting. *Biology*.
- Zhong, X.-Z., Li, X.-X., Zeng, Y., Wang, S.-P., Sun, Z.-Y., & Tang, Y.-q. (2020). Dynamic change of bacterial community during dairy manure composting process. *Bioresource Technology*.

9. Anexos

Anexo A: Código fuente:

Librerías utilizadas:

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <I2C_RTC.h>
#include "AM2315C.h"
#include <DHT.h>
```

Definiciones y objetos:

```
// ===== RTC =====
static DS1307 RTC;

// ===== SENSORES =====
AM2315C am2305;
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

// ===== SD =====
#define SD_CS 4
File logFile;

// ===== LEDS =====
#define LED_MESO 13
#define LED_TERM 7
#define LED_ENF 8

// ===== MOTOR NEMA23 =====
#define STEP_PIN 9
#define DIR_PIN 8
#define STEP_DELAY 500
#define MICROSTEP 8
#define PASOS_REV 200
#define MEDIO_GIRO (PASOS_REV * MICROSTEP / 2)

// ===== VARIABLES =====
float tAM, hAM, tDHT, hDHT;
float tempDias[3];
int ultimoDia = -1;
bool enfriamiento = false;

// Timers motor
unsigned long ultimoGiroTermo = 0;
```



```
unsigned long ultimoGiroEnf = 0;
```

Setup()

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  Wire.begin();  
  
  am2305.begin();  
  dht.begin();  
  RTC.begin();  
  SD.begin(SD_CS);  
  
  pinMode(LED_MESO, OUTPUT);  
  pinMode(LED_TERMO, OUTPUT);  
  pinMode(LED_ENF, OUTPUT);  
  pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);  
  pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);  
  
  Serial.println("Sistema de compostaje iniciado");  
}
```

Loop Principal:

```
void loop() {  
  leerAM2305();  
  leerDHT11();  
  
  detectarEtapas();  
  detectarEnfriamientoRTC();  
  
  controlarMotor();  
  guardarSD();  
  
  delay(5000);  
}
```

Lectura del Sensor AM2305 (Utiliza la librería de Rob Tilaart - AM2315C):

```
bool leerAM2305() {  
  if (millis() - am2305.lastRead() < 1000) return false;  
  
  if (am2305.read() == AM2315C_OK) {  
    tAM = am2305.getTemperature();  
    hAM = am2305.getHumidity();  
    return true;  
  }  
  return false;  
}
```

Lectura del sensor DHT11 (Externo):

```
bool leerDHT11() {  
    hDHT = dht.readHumidity();  
    tDHT = dht.readTemperature();  
    return !(isnan(hDHT) || isnan(tDHT));  
}
```

Identificación de las etapas Mesófila y Termófila

```
void detectarEtapas() {  
    digitalWrite(LED_MESO, (tAM >= 0 && tAM <= 45));  
    digitalWrite(LED_TERMO, (tAM > 45 && tAM <= 80));  
}
```

Identificación de la etapa de Enfriamiento (cuando la temperatura ha descendido durante 3 días continuos)

```
void detectarEnfriamientoRTC() {  
    int hora = RTC.getHours();  
    int dia = RTC.getDay();  
  
    if (hora == 12 && dia != ultimoDia) {  
        tempDias[0] = tempDias[1];  
        tempDias[1] = tempDias[2];  
        tempDias[2] = tAM;  
        ultimoDia = dia;  
  
        enfriamiento = (tempDias[0] > tempDias[1] && tempDias[1] > tempDias[2]);  
    }  
  
    digitalWrite(LED_ENF, enfriamiento);  
}
```

Activación del motor NEMA23 (cada 3 horas en etapa termófila y cada 5 horas en etapa de enfriamiento):

```
void controlarMotor() {  
    unsigned long ahora = millis();
```

```

if (digitalRead(LED_TERMO) && ahora - ultimoGiroTermo >= 10800000UL) {
    rotarCompostador();
    ultimoGiroTermo = ahora;
}

if (enfriamiento && ahora - ultimoGiroEnf >= 18000000UL) {
    rotarCompostador();
    ultimoGiroEnf = ahora;
}
}

```

Activación de la función de rotación:

```

void rotarCompostador() {
    digitalWrite(DIR_PIN, HIGH);
    for (int i = 0; i < MEDIO_GIRO; i++) {
        digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
        delayMicroseconds(STEP_DELAY);
        digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
        delayMicroseconds(STEP_DELAY);
    }

    digitalWrite(DIR_PIN, LOW);
    for (int i = 0; i < MEDIO_GIRO; i++) {
        digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
        delayMicroseconds(STEP_DELAY);
        digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
        delayMicroseconds(STEP_DELAY);
    }
}

```

Registro de los datos en MicroSD (Archivo compost.csv):

```

void guardarSD() {

```

```
logFile = SD.open("compost.csv", FILE_WRITE);
if (logFile) {
  logFile.print(RTC.getDateTimeString());
  logFile.print(",");
  logFile.print(tAM); logFile.print(",");
  logFile.print(hAM); logFile.print(",");
  logFile.print(tDHT); logFile.print(",");
  logFile.println(hDHT);
  logFile.close();
}
}
```

Anexo B: Datos de temperatura arrojados por el compostador

Los registros limpios completos por corrida (prueba) se pueden consultar en:

https://drive.google.com/drive/folders/12YG-Da-qZg3IVxoyF_1AfCfNhHjWawk2?usp=sharing

≡ 1aCorrAutomMeso.txt X Temps > ≡ 1aCorrAutomMeso.txt <table><tr><td>1</td><td>20.2</td></tr><tr><td>2</td><td>20.4</td></tr><tr><td>3</td><td>21.0</td></tr><tr><td>4</td><td>22.9</td></tr><tr><td>5</td><td>24.3</td></tr><tr><td>6</td><td>25.4</td></tr><tr><td>7</td><td>26.2</td></tr><tr><td>8</td><td>27.8</td></tr><tr><td>9</td><td>28.4</td></tr><tr><td>10</td><td>30.6</td></tr><tr><td>11</td><td>30.7</td></tr><tr><td>12</td><td>31.1</td></tr><tr><td>13</td><td>21.9</td></tr><tr><td>14</td><td>23.8</td></tr><tr><td>15</td><td>23.9</td></tr><tr><td>16</td><td>25.4</td></tr><tr><td>17</td><td>26.1</td></tr><tr><td>18</td><td>27.8</td></tr><tr><td>19</td><td>28.9</td></tr><tr><td>20</td><td>30.7</td></tr><tr><td>21</td><td>30.7</td></tr></table>	1	20.2	2	20.4	3	21.0	4	22.9	5	24.3	6	25.4	7	26.2	8	27.8	9	28.4	10	30.6	11	30.7	12	31.1	13	21.9	14	23.8	15	23.9	16	25.4	17	26.1	18	27.8	19	28.9	20	30.7	21	30.7	≡ 1aCorrAutomTermo.txt X Temps > ≡ 1aCorrAutomTermo.txt <table><tr><td>1</td><td>45.6</td></tr><tr><td>2</td><td>45.7</td></tr><tr><td>3</td><td>46.6</td></tr><tr><td>4</td><td>47.2</td></tr><tr><td>5</td><td>48.2</td></tr><tr><td>6</td><td>49.1</td></tr><tr><td>7</td><td>50.2</td></tr><tr><td>8</td><td>50.7</td></tr><tr><td>9</td><td>51.0</td></tr><tr><td>10</td><td>51.9</td></tr><tr><td>11</td><td>52.8</td></tr><tr><td>12</td><td>52.8</td></tr><tr><td>13</td><td>47.1</td></tr><tr><td>14</td><td>47.4</td></tr><tr><td>15</td><td>48.1</td></tr><tr><td>16</td><td>48.3</td></tr><tr><td>17</td><td>48.8</td></tr><tr><td>18</td><td>49.3</td></tr><tr><td>19</td><td>50.0</td></tr><tr><td>20</td><td>50.7</td></tr><tr><td>21</td><td>51.6</td></tr></table>	1	45.6	2	45.7	3	46.6	4	47.2	5	48.2	6	49.1	7	50.2	8	50.7	9	51.0	10	51.9	11	52.8	12	52.8	13	47.1	14	47.4	15	48.1	16	48.3	17	48.8	18	49.3	19	50.0	20	50.7	21	51.6
1	20.2																																																																																				
2	20.4																																																																																				
3	21.0																																																																																				
4	22.9																																																																																				
5	24.3																																																																																				
6	25.4																																																																																				
7	26.2																																																																																				
8	27.8																																																																																				
9	28.4																																																																																				
10	30.6																																																																																				
11	30.7																																																																																				
12	31.1																																																																																				
13	21.9																																																																																				
14	23.8																																																																																				
15	23.9																																																																																				
16	25.4																																																																																				
17	26.1																																																																																				
18	27.8																																																																																				
19	28.9																																																																																				
20	30.7																																																																																				
21	30.7																																																																																				
1	45.6																																																																																				
2	45.7																																																																																				
3	46.6																																																																																				
4	47.2																																																																																				
5	48.2																																																																																				
6	49.1																																																																																				
7	50.2																																																																																				
8	50.7																																																																																				
9	51.0																																																																																				
10	51.9																																																																																				
11	52.8																																																																																				
12	52.8																																																																																				
13	47.1																																																																																				
14	47.4																																																																																				
15	48.1																																																																																				
16	48.3																																																																																				
17	48.8																																																																																				
18	49.3																																																																																				
19	50.0																																																																																				
20	50.7																																																																																				
21	51.6																																																																																				
≡ 1aCorrAutomEnfr.txt X Temps > ≡ 1aCorrAutomEnfr.txt <table><tr><td>1</td><td>69.2</td></tr><tr><td>2</td><td>67.9</td></tr><tr><td>3</td><td>67.4</td></tr><tr><td>4</td><td>65.8</td></tr><tr><td>5</td><td>65.1</td></tr><tr><td>6</td><td>63.8</td></tr><tr><td>7</td><td>62.3</td></tr><tr><td>8</td><td>61.7</td></tr><tr><td>9</td><td>61.5</td></tr><tr><td>10</td><td>60.5</td></tr><tr><td>11</td><td>59.1</td></tr><tr><td>12</td><td>57.5</td></tr><tr><td>13</td><td>67.1</td></tr><tr><td>14</td><td>65.9</td></tr><tr><td>15</td><td>64.5</td></tr><tr><td>16</td><td>63.2</td></tr><tr><td>17</td><td>61.9</td></tr><tr><td>18</td><td>61.8</td></tr><tr><td>19</td><td>61.2</td></tr><tr><td>20</td><td>60.1</td></tr><tr><td>21</td><td>58.8</td></tr></table>	1	69.2	2	67.9	3	67.4	4	65.8	5	65.1	6	63.8	7	62.3	8	61.7	9	61.5	10	60.5	11	59.1	12	57.5	13	67.1	14	65.9	15	64.5	16	63.2	17	61.9	18	61.8	19	61.2	20	60.1	21	58.8	≡ 1aCorrMaduracAutom.txt X Temps > ≡ 1aCorrMaduracAutom.txt <table><tr><td>1</td><td>22.0</td></tr><tr><td>2</td><td>21.9</td></tr><tr><td>3</td><td>21.8</td></tr><tr><td>4</td><td>21.8</td></tr><tr><td>5</td><td>21.8</td></tr><tr><td>6</td><td>21.6</td></tr><tr><td>7</td><td>21.6</td></tr><tr><td>8</td><td>21.6</td></tr><tr><td>9</td><td>21.5</td></tr><tr><td>10</td><td>21.5</td></tr><tr><td>11</td><td>21.3</td></tr><tr><td>12</td><td>21.3</td></tr><tr><td>13</td><td>21.8</td></tr><tr><td>14</td><td>21.8</td></tr><tr><td>15</td><td>21.8</td></tr><tr><td>16</td><td>21.8</td></tr><tr><td>17</td><td>21.7</td></tr><tr><td>18</td><td>21.6</td></tr><tr><td>19</td><td>21.6</td></tr><tr><td>20</td><td>21.5</td></tr><tr><td>21</td><td>21.4</td></tr></table>	1	22.0	2	21.9	3	21.8	4	21.8	5	21.8	6	21.6	7	21.6	8	21.6	9	21.5	10	21.5	11	21.3	12	21.3	13	21.8	14	21.8	15	21.8	16	21.8	17	21.7	18	21.6	19	21.6	20	21.5	21	21.4
1	69.2																																																																																				
2	67.9																																																																																				
3	67.4																																																																																				
4	65.8																																																																																				
5	65.1																																																																																				
6	63.8																																																																																				
7	62.3																																																																																				
8	61.7																																																																																				
9	61.5																																																																																				
10	60.5																																																																																				
11	59.1																																																																																				
12	57.5																																																																																				
13	67.1																																																																																				
14	65.9																																																																																				
15	64.5																																																																																				
16	63.2																																																																																				
17	61.9																																																																																				
18	61.8																																																																																				
19	61.2																																																																																				
20	60.1																																																																																				
21	58.8																																																																																				
1	22.0																																																																																				
2	21.9																																																																																				
3	21.8																																																																																				
4	21.8																																																																																				
5	21.8																																																																																				
6	21.6																																																																																				
7	21.6																																																																																				
8	21.6																																																																																				
9	21.5																																																																																				
10	21.5																																																																																				
11	21.3																																																																																				
12	21.3																																																																																				
13	21.8																																																																																				
14	21.8																																																																																				
15	21.8																																																																																				
16	21.8																																																																																				
17	21.7																																																																																				
18	21.6																																																																																				
19	21.6																																																																																				
20	21.5																																																																																				
21	21.4																																																																																				

Anexo C: Póster Publicado



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

cenidet[®]
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



INSTITUTO TECNOLÓGICO
IZTAPALAPA

Automatización de un Compostador de uso Casero

Gerardo G. Reyes H*, Gloria L. Osorio G., Rodolfo A. Vargas M
*TecNM - Campus Iztapalapa 3 / CENIDET

Problemática

La generación de residuos en los hogares mexicanos es un tema relevante. Según el INEGI, en 2019, la generación per cápita de residuos sólidos urbanos (RSU) en México fue de aproximadamente 1.04 kg por día. Además de los RSU, se generan grandes cantidades de desechos vegetales provenientes de restos de alimentos y jardinería, que pueden ser aprovechados mediante compostaje.

Justificación

El compostaje reduce hasta en 80% la cantidad de desechos que llegan a los vertederos. Al compostar restos de comida, hojas y césped, se evita que se conviertan en basura y se reduce la contaminación ambiental. El compostaje produce compost, un material rico en nutrientes que mejora la calidad del suelo, enriquece con nutrientes esenciales, mejora su estructura y retiene la humedad, promoviendo el crecimiento saludable de las plantas. La cantidad del producto final es significativamente menor que la mezcla inicial, mostrando una considerable disminución de desechos (Fig. 1)

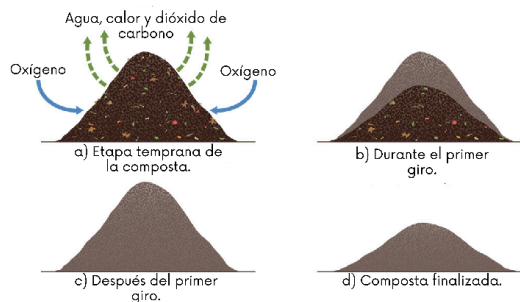


Fig. 1 Dimensiones de la pila de compost y técnicas de volteo. Ilustración de Vic Kulihin.

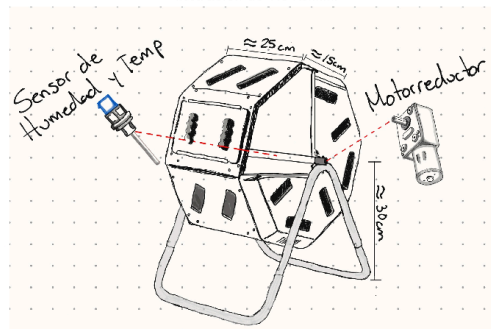


Fig. 2 Boceto de la propuesta del compostador automatizado. Ilustración propia.

Propuesta de solución

Desarrollar un compostador equipado con sensores que medirán constantemente la relación humedad-temperatura del compost, factores cruciales para la descomposición. Además, incluirá un motor para rotar y mezclar los residuos en su interior. Aunque existen otros compostadores con sensores, este diseño se destaca por mantener un proceso natural sin deshidratar la mezcla y por el uso del motor para rotar el contenedor, algo no encontrado en otros modelos. El recipiente tendrá una capacidad de al menos 20 litros (Fig. 2)

Objetivo

Eficientar la gestión de desechos vegetales a través del diseño de un compostador automatizado que controle los parámetros de temperatura y humedad para producir compost en el menor tiempo posible aplicado a espacios reducidos. En otras palabras, lograr las fases del compost (Fig. 2) en un ambiente controlado mediante sensores instalados en el compostador.

Referencias:

1. Arízaga G. R., Fernández F. J., Vasconez S. S. (2023). Sistema de compostaje automatizado para desechos sólidos orgánicos generados en un mercado. Pol. Con. (Edición núm. 85) Vol. 8, No 8. ISSN: 2550 - 682X.
2. Hernández fuentes, J. (2022). Prototipo de red inalámbrica de sensores para la medición de temperatura y humedad del suelo en huertos y compost Parque Biotemático Megua. Corporación Universidad de la Costa.
3. Rivas N. M., Silva A. R. (2019). Calidad física y química de tres compost, elaborados con residuos de jardinería, pergamino de café y bora (Eichhornia Crassipes). Revista Ciencia Unemi, vol. 13, núm. 32, pp. 87-100, 2020. Universidad Estatal de Milagro.



**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

**Gerardo Galileo Reyes Hernández, Gloria Lilia Osorio Gordillo,
Rodolfo Amalio Vargas Méndez**

Por su invaluable presentación del Póster:

Automatización de un Compostador de uso Casero

En el II Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada, desarrollado en el Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, TecNM/CENIDET, del 22 al 24 de mayo de 2024.

Cuernavaca, Morelos, 24 de mayo de 2024

DR. ARTURO ERNESTO MARES GARDEA
DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

DR. ARTURO ABÚNDEZ PLIEGO
COORDINADOR GENERAL
II CITCA



Sello Digital:

sfmBvmie443ytQ8L9Tf0dMdYW3P5relyhp96tDBMFM2FGSgPNrCnULjzW0dv535FD61TRboUg04jp5FP4V+JT1
kTo6A57EYeh6UtzaOPykgzxhZv4AJczXz1PwJkO2WX5I0/8dP+wEzhZMMz6WPF9rJGZ5iEP0LmK3SPM3bz7PtY
fSLFHwtM5Uvm/Y6PTvXcGQBdvCTXXhQGPgkYORVxpMB2eG2IHvo5+nZ1Av1z8LLso4IsxeEse8LKXNTKTURj5
MjkiUQIJmrevP0AYLzYMQStOzLhTBOrX/vBceIsQhf2UUu4OAIZOMJlUXWB+nqg+ggjINdh+y8KYbEfnQxA==

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>
CITCA01060124

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

CITCA
CONGRESO INTERNACIONAL DE TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA



Anexo D: Artículo Publicado



Reduction of Plant Waste in Landfills through Composting Techniques

Reyes H. Gerardo G. *, **, Osorio G. Gloria L. **, Vargas M. Rodolfo A. **, Reyes R. Juan **, Astorga Z. Carlos M. **

*Tecnológico Nacional de México / IT Itapalapa 3, Orquídea 71, San Miguel Teotongo, Itapalapa, 09630, CDMX.

**Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Palmira, 62493 Cuernavaca, Mor.

Abstract: This article presents a proposal for composting using innovative technology. The device will regulate critical parameters such as temperature and humidity, offering an accessible solution for households to actively participate in environmental conservation. In an era where environmental challenges require innovative solutions, household waste management has become a critical area. Traditional composting methods, while beneficial, often present barriers for urban dwellers due to lack of space, inconsistent decomposition, and bad odors, limiting their adoption and potential to reduce waste and greenhouse gas emissions. The proposal uses smart technology to facilitate composting, integrating sensors and automatic controls that optimize essential parameters such as temperature, humidity, and aeration, minimizing user intervention. This will achieve consistent decomposition rates, making it suitable for urban spaces and conventional homes. The device will reduce decomposition time compared to traditional methods and will be designed to be user-friendly. In addition, automation will ensure adequate humidity and temperature levels, improving process efficiency and promoting sustainable practices by simplifying home composting.

Keywords: Automated composting, Domestic waste management, Urban sustainability, Organic waste recycling, Environmental technology.

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo que enfrenta crecientes desafíos ambientales, la gestión eficiente de residuos orgánicos se ha convertido en una prioridad. El compostaje, un proceso milenario que transforma desechos orgánicos en nutrientes valiosos para el suelo, surge como una solución sostenible y efectiva. Sin embargo, la complejidad inherente a este proceso bioquímico, influenciado por múltiples variables interrelacionadas, ha limitado históricamente su adopción en entornos domésticos y urbanos.

La creciente crisis climática global demanda soluciones innovadoras y accesibles que permitan a los individuos y comunidades contribuir significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, la implementación de compostadores automatizados se posiciona como una estrategia, no solo para mitigar el cambio climático, sino también para ofrecer beneficios directos a nivel comunitario y urbano. Según la Food and Agriculture Organization (2022), cada año se pierden o desperdician 1.300 millones de toneladas de alimentos a nivel mundial. El compostaje ofrece una vía sostenible para transformar estos residuos en un recurso, reduciendo la presión sobre los vertederos y prolongando su vida útil.

El desvío de residuos orgánicos hacia el compostaje, en lugar de su disposición en vertederos, no solo reduce la producción de metano —un gas de efecto invernadero 25 veces más potente que el dióxido de carbono (Pachauri, 2014)—, sino que

también mejora la calidad del suelo y promueve prácticas agrícolas sostenibles. Como señalan Martínez-Blanco et al. (2021), el compost no solo es un abono natural, sino que además incrementa la productividad de la tierra sin necesidad de químicos dañinos, lo que es especialmente relevante en entornos urbanos con limitaciones de espacio verde y calidad del suelo.

A nivel comunitario, el compostaje automatizado puede fomentar un sentido de pertenencia y responsabilidad ambiental, fortaleciendo la cohesión social a través de iniciativas de compostaje comunitario. Tal como indica Geisel (2009), el compostaje ahorra agua, mejora la retención de humedad en el suelo y reduce la escorrentía, mientras recicla materiales orgánicos y conserva el espacio de los vertederos. En este sentido, el diseño del compostador propuesto en este trabajo, que combina métodos tradicionales con tecnología moderna, busca optimizar estos beneficios, haciendo del compostaje una práctica accesible y eficiente para todos.

En la Figura 1 se muestra el proceso de compostaje, donde se pueden identificar 4 fases: Mesófila, Termófila, Enfriamiento y Maduración. Cada una de estas tiene características específicas.

La primera fase, Mesófila, tiene una duración desde 2 a 8 días, caracterizada por la proliferación de microorganismos que crecen a temperaturas moderadas. Esta fase puede alcanzar una



temperatura de aproximadamente 45°C, condiciones que permite la descomposición de azúcares y aminoácidos simples.

La segunda fase, Termófila, se caracteriza por alcanzar temperaturas máximas de hasta 70°C, identificando el gran número de bacterias termófilas y actinobacterias en la mezcla inicial y se observa la degradación de proteínas, grasas, celulosa y hemicelulosa. Esta fase puede durar de un par de semanas hasta algunos meses, dependiendo de las condiciones climáticas.

En la tercera fase, de Enfriamiento, se puede notar una disminución de la temperatura, identificando la respiración de hongos y bacterias mesófilas, por ello en ocasiones también se conoce a esta fase como Mesófila II. Puede durar un par de semanas, dependiendo de las condiciones climáticas, ya que la temperatura desciende hasta a alcanzar la ambiente.

Finalmente se presenta la fase 4, de Maduración, con una duración aproximada de 1 a 2 meses. El compost alcanza un color oscuro, olor a tierra y una textura suelta. Ya no se identifican los materiales originales.

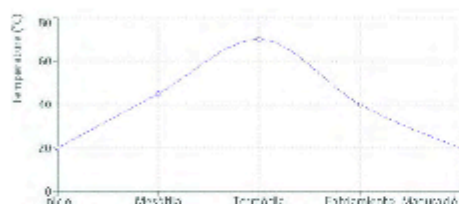


Figura 1. Variación de la temperatura con respecto a cada una de las fases del compostaje.

2. ANTECEDENTES

2.1. Compostaje

El proceso de compostaje consiste en reproducir parte del ciclo biológico natural de crecimiento y descomposición. Al morir, las plantas y los animales que de ellas se alimentan se convierten en la materia prima para el proceso de descomposición y humificación (R. Docampo, 2013). Este proceso natural imita y acelera la descomposición que ocurre en los ecosistemas, convirtiendo los desechos en un valioso recurso para la agricultura y la jardinería.

2.2. Principios del Compostaje

- i. **Descomposición Microbiana:** El compostaje se basa en la actividad de diversos microorganismos, principalmente bacterias y hongos, que descomponen la materia orgánica. Estos microorganismos requieren condiciones específicas para funcionar de manera óptima (Ryckleboer et al., 2021).

- ii. **Relación Carbono-Nitrógeno (C:N):** Una relación C:N adecuada, idealmente alrededor de 30:1, es crucial para un compostaje eficiente. Los materiales ricos en carbono (como hojas secas o aserrín) se combinan con materiales ricos en nitrógeno (como recortes de césped o restos de frutas y verduras) para lograr este equilibrio (Zhang y Sun, 2022).
- iii. **Aireación:** El proceso de compostaje es predominantemente aeróbico, requiriendo oxígeno para la actividad microbiana. Una aireación adecuada previene condiciones anaeróbicas que pueden generar olores desagradables y ralentizar el proceso (Guo et al., 2023).
- iv. **Humedad:** Un contenido de humedad de entre 50-60% es requerido para el compostaje. Demasiada agua puede llevar a condiciones anaeróbicas, mientras que poca humedad puede detener la actividad microbiana (Chen et al., 2022).
- v. **Temperatura:** El proceso de compostaje pasa por fases de temperatura, incluyendo una fase termófila (45-70°C) que es crucial para la eliminación de patógenos y semillas de malezas (Sánchez-Monedero et al., 2021).

2.3. Impacto ambiental de los residuos orgánicos

Los residuos orgánicos, que abarcan desde restos de alimentos hasta residuos de jardinería y otros materiales biodegradables, representan una fracción considerable de los desechos generados a nivel mundial. Impactando en diversos aspectos de los ecosistemas terrestres, acuáticos y atmosféricos.

Uno de los impactos más significativos de los residuos orgánicos se manifiesta en la emisión de gases de efecto invernadero. Cuando estos residuos se descomponen en condiciones anaeróbicas en vertederos, producen metano, un gas aproximadamente 25 veces más potente que el dióxido de carbono en términos de retención de calor atmosférico. Se estima que los vertederos son responsables de cerca del 20% de las emisiones antropogénicas globales de metano, contribuyendo significativamente al cambio climático y sus consecuencias asociadas, como el aumento del nivel del mar y la alteración de los patrones climáticos (Sharma et al., 2023).

La contaminación del agua es otro problema crítico asociado con la gestión inadecuada de residuos orgánicos. La descomposición de estos materiales en vertederos genera lixiviados, líquidos que pueden infiltrarse en el suelo y contaminar acuíferos y cursos de agua cercanos. Estos lixiviados a menudo contienen altas concentraciones de nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos, representando una amenaza seria para la calidad del agua y la salud de los ecosistemas acuáticos.

El impacto en el suelo también es considerable. La acumulación de residuos orgánicos en vertederos no solo

ocupa terrenos que podrían tener otros usos productivos, sino que también puede llevar a la degradación del suelo circundante. La descomposición inadecuada puede resultar en la acidificación del suelo y la alteración de sus propiedades físicas y químicas, afectando negativamente su fertilidad y capacidad para sustentar la vida vegetal.

Desde una perspectiva de salud pública y biodiversidad, los residuos orgánicos mal gestionados pueden convertirse en focos de proliferación de vectores y patógenos. Atraen roedores, insectos y otros portadores de enfermedades, creando riesgos potenciales para la salud humana y animal. Además, la contaminación derivada de estos residuos puede tener efectos adversos en los ecosistemas locales, alterando el delicado equilibrio de flora y fauna.

El desperdicio de recursos es otro aspecto preocupante. Cuando los residuos orgánicos terminan en vertederos, se pierden valiosos nutrientes y materia orgánica que podrían ser reciclados y reintegrados al ciclo de nutrientes del suelo. Esta pérdida no solo representa una oportunidad desperdiciada para mejorar la fertilidad del suelo, sino que también contribuye a la dependencia continua de fertilizantes sintéticos en la agricultura.

Aunque la gestión inadecuada de residuos orgánicos puede parecer un problema limitado al ámbito local, sus efectos van mucho más allá. Las naciones enfrentan costos relacionados con el transporte, la disposición final y el tratamiento de lixiviados, lo que representa un desafío económico significativo. Además, esta mala gestión genera problemas de contaminación atmosférica, visual y olfativa que afectan la calidad de vida de las comunidades cercanas. Sin embargo, el impacto no se detiene ahí: estos problemas locales contribuyen al deterioro ambiental y al cambio climático a nivel global, lo que subraya la urgencia de adoptar enfoques más sostenibles en la gestión de residuos.

La magnitud y diversidad de estos impactos subrayan la importancia crítica de implementar estrategias efectivas de gestión de residuos orgánicos. Soluciones como el compostaje, a través de sistemas automatizados como el propuesto en este estudio, ofrecen una alternativa para mitigar estos impactos negativos. Al transformar lo que tradicionalmente se ha considerado un problema ambiental en un recurso valioso para la agricultura y la restauración de ecosistemas, estas tecnologías no solo abordan los desafíos inmediatos de la gestión de residuos, sino que también contribuyen a la construcción de sistemas sostenibles y circulares de producción y consumo.

2.4. Tecnologías existentes en compostaje doméstico

El compostaje doméstico ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, pasando de pilas de residuos en el jardín a sistemas sofisticados diseñados para optimizar el proceso y hacerlo accesible para los hogares urbanos. Esta evolución refleja una creciente conciencia ambiental y la

necesidad de soluciones prácticas para la gestión de residuos orgánicos.

Los compostadores de patio tradicionales siguen siendo una opción popular para quienes disponen de espacio exterior. Estos sistemas, que van desde contenedores de madera o plástico hasta modelos más elaborados con múltiples compartimentos, permiten a los usuarios depositar sus residuos orgánicos y dejar que la naturaleza haga su trabajo. Aunque requieren cierto grado de mantenimiento, como el volteo periódico y el control de la humedad, ofrecen una forma económica y directa de producir compost.

Para aquellos con espacio limitado o que buscan un proceso más rápido, los compostadores giratorios o de tambor han ganado popularidad. Estos dispositivos consisten en un contenedor cilíndrico montado sobre un eje que permite girar fácilmente el contenido. Esta rotación mejora la aireación y acelera el proceso de descomposición, produciendo compost en cuestión de semanas en lugar de meses. Además, su diseño cerrado ayuda a controlar olores y plagas, haciéndolos adecuados para entornos urbanos.

En los últimos años, los sistemas de compostaje por lombrices, o vermicompostaje, han ganado adeptos entre los entusiastas del compostaje doméstico. Estos sistemas utilizan lombrices rojas para procesar los residuos orgánicos, produciendo un compost rico en nutrientes conocido como humus de lombriz. Los vermicompostadores son especialmente populares para uso en interiores, ya que son compactos, no producen olores si se manejan correctamente y pueden procesar eficientemente los residuos de cocina.

Para aquellos que buscan soluciones aún más convenientes, los compostadores eléctricos surgen como una opción atractiva. Estos dispositivos compactos utilizan calor y agitación mecánica para acelerar el proceso de descomposición, produciendo compost en cuestión de horas o días. Aunque su capacidad es limitada y consumen energía, ofrecen una solución práctica para hogares urbanos sin acceso a espacios exteriores.

Con los avances tecnológicos se han desarrollado compostadores automatizados. Estos sistemas integran sensores y controladores para monitorear y ajustar parámetros clave como temperatura, humedad y aireación. Algunos modelos incluyen características como trituradoras integradas, sistemas de filtración de olores y conectividad Wi-Fi para monitoreo remoto.

A medida que crece la preocupación por la sostenibilidad y la gestión de residuos, es probable que veamos un continuo desarrollo e innovación en las tecnologías de compostaje doméstico. La tendencia apunta hacia sistemas cada vez más eficientes, compactos y fáciles de usar, que puedan integrarse en la vida cotidiana de las personas, independientemente de su espacio o estilo de vida.



3. PROPUESTA DE DISEÑO DE COMPOSTADOR

3.1. Descripción general del sistema

La Figura 2 muestra el compostador que se propone, es un dispositivo diseñado para acelerar el proceso de compostaje doméstico, haciéndolo accesible para usuarios en entornos urbanos. Este sistema integra tecnología para controlar y monitorear los parámetros críticos del compostaje, minimizando la intervención manual.

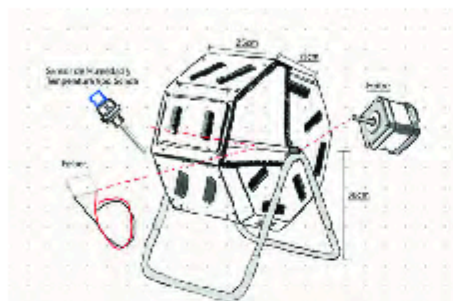


Figura 2. Diseño propuesto para el compostador automatizado.

El núcleo del sistema es un contenedor hermético, capaz de mantener las condiciones internas óptimas para el compostaje. Equipado con sensores de temperatura y humedad que monitorean constantemente el ambiente interno. Un microcontrolador central para procesar estos datos y controlar los actuadores para mantener las condiciones apropiadas.

El sistema incluye un mecanismo de aireación automatizado para asegurar un suministro adecuado de oxígeno, crucial para el proceso aeróbico. Este mecanismo puede ser un sistema de volteo mecánico, activado según las necesidades detectadas por los sensores.

Para mantener el nivel de humedad óptimo, el compostador cuenta con un sistema de riego por aspersión controlado que añade agua cuando es necesario. Además, incorpora un sistema de calefacción para acelerar el proceso de descomposición en climas fríos y mantener las temperaturas apropiadas para la actividad microbiana.

Este compostador pretende producir compost en un tiempo reducido, contribuyendo así a una gestión eficiente de los residuos orgánicos domésticos.

3.2. Componentes clave (sensores, actuadores, sistema de control)

En el compostador residen un conjunto de sensores, actuadores y un sistema de control que trabajan en conjunto para automatizar el proceso de compostaje.

Sensores

Los sensores recolectan datos en tiempo real sobre diversos parámetros ambientales. Entre los sensores más comunes y relevantes para el compostaje se encuentran:

Sensor de temperatura: Mide la temperatura interna del compostador, un indicador clave de la actividad microbiana y la velocidad de descomposición.

Sensor de humedad: Monitorea el contenido de humedad del material de compostaje, un factor crítico para el crecimiento de los microorganismos.

Actuadores

Los actuadores ejecutan las acciones necesarias para mantener las condiciones adecuadas de compostaje. Algunos ejemplos de actuadores comunes incluyen:

Motores: Accionan mecanismos de mezclado o agitación para homogeneizar el material de compostaje y mejorar la aireación.

Calefactores/refrigeradores: Regulan la temperatura interna del compostador, especialmente en climas extremos.

Sistema de Control

El sistema de control integra la información proveniente de los sensores y enviando comandos a los actuadores para mantener las condiciones de compostaje dentro de los rangos establecidos. Los componentes clave de un sistema de control incluyen:

Microcontrolador: Una placa Arduino se encargará de procesar los datos de los sensores, tomar decisiones y enviar señales a los actuadores.

Software: El software define la lógica de control, incluyendo algoritmos para el control de temperatura, humedad y aireación.

Interfaz de usuario: Permite al usuario monitorear el estado del compostador, ajustar los parámetros de funcionamiento y recibir alertas en caso de anomalías.

El diagrama de la Figura 3 muestra el algoritmo de monitoreo y almacenamiento de la información recibida de los sensores. Este representa de manera visual el flujo de ejecución del programa. Comienza con la inicialización de los componentes para luego entrar en un bucle principal donde se lee la medición de los sensores, se obtiene el tiempo del RTC (Real Time Clock), se escriben los datos en la tarjeta SD (Secure Digital) y se muestran en el monitor serial. El proceso se repite cada 12 horas.

Este algoritmo crea un sistema de registro ambiental que mide temperatura y humedad en dos ubicaciones (interna y externa), registra estos datos con marcas de tiempo en una tarjeta SD, y proporciona una salida en tiempo real a través del monitor serial. Este tipo de sistema es útil para monitoreo ambiental,

control de invernaderos, o cualquier aplicación que requiera un seguimiento detallado de las condiciones de temperatura y humedad a lo largo del tiempo.



Figura 3. Algoritmo para monitorear la humedad y la temperatura, tanto internas como externas del compostador.

4. METODOLOGÍA

4.1. Diseño Experimental

El objetivo principal de este estudio es evaluar la eficiencia del compostador en comparación con el método tradicional de compostaje en pilas. Se plantea la hipótesis de que el compostador automático producirá compost en un tiempo menor.

Se partirá de dos grupos de material orgánico con características iniciales idénticas, incluyendo restos de cocina y jardín. Ambos grupos serán sometidos a un proceso de compostaje, pero utilizando métodos diferentes:

Grupo 1: Compostador Automático: El material orgánico se introducirá en el compostador propuesto, el cual controlará de forma precisa la humedad y la temperatura dentro del contenedor.

Grupo 2: Compostador Tradicional: El material orgánico se colocará en una pila de compostaje y se mezclará manualmente de forma regular para asegurar una aireación adecuada.

4.2. Parámetros Monitoreados y Controlados

Tiempo de maduración: Se registrará el tiempo necesario para que el compost alcance la madurez en ambos grupos.

Humedad: Se medirá la humedad del compost a intervalos regulares para garantizar que se mantenga dentro de los rangos adecuados para el desarrollo de los microorganismos.

Temperatura: Se monitoreará la temperatura del compost para asegurar que se alcancen las temperaturas necesarias para la descomposición de la materia orgánica.

4.3. Procedimiento:

Preparación de los materiales: Se seleccionará y preparará un volumen igual de material orgánico para ambos grupos,

asegurando que tengan una composición similar en términos de relación carbono/nitrógeno y tamaño de partícula.

Inicio del proceso de compostaje: Se iniciará simultáneamente el proceso de compostaje en ambos grupos.

Monitoreo: Se realizarán mediciones periódicas de las variables mencionadas anteriormente en ambos grupos.

Análisis estadístico: Los datos obtenidos se analizarán utilizando pruebas estadísticas apropiadas para comparar las diferencias entre los dos grupos y evaluar si el compostador cumple con los objetivos planteados.

4.4. Resultados esperados

El compostador automatizado reducirá el tiempo de maduración del compost en comparación con el método tradicional. Además, se espera que el compost producido por el compostador propuesto tenga una mayor homogeneidad y un contenido de nutrientes más estable.

Este diseño experimental permitirá promover el desarrollo de tecnologías sostenibles para la gestión de residuos orgánicos.

5. POTENCIAL DE MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El compostador propuesto se presenta como una herramienta clave en la mitigación del cambio climático. Al acelerar el proceso de compostaje esta tecnología contribuye significativamente a reducir las emisiones de metano provenientes de los vertederos, donde los residuos orgánicos se descomponen en ausencia de oxígeno generando este potente gas de efecto invernadero. Además, el compost producido enriquece los suelos con materia orgánica, aumentando su capacidad para mantener carbono atmosférico. Esto, sumado a la promoción de prácticas agrícolas sostenibles que reducen la dependencia de fertilizantes químicos, contribuye a la captura de carbono en los suelos y a la adaptación al cambio climático.

En el contexto cotidiano, donde la generación diaria de residuos orgánicos es considerable, la implementación a gran escala de compostadores automatizados podría tener un impacto transformador. Al reducir la cantidad de residuos enviados a vertederos, se prolonga la vida útil de estos y se disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, el compost producido puede ser utilizado en la agricultura, mejorando la calidad de los suelos y la productividad de los cultivos.

5.1. Beneficios para la comunidad y el medio ambiente urbano

El compostaje automatizado aporta ventajas significativas a nivel comunitario y urbano. Al reducir la cantidad de residuos orgánicos enviados a vertederos, se disminuye la presión sobre estos espacios y se prolonga su vida útil. "Cada año en todo el mundo se pierden o desperdician 1.300 millones de toneladas

de alimentos" (Food and Agriculture Organization, 2022). El compostaje ofrece una solución sostenible a este problema, transformando los residuos orgánicos en un recurso valioso.

Además de reducir la generación de residuos, el compostaje contribuye a mejorar la calidad del suelo y a promover prácticas agrícolas más sostenibles. Según Martínez-Blanco et al., (2021), "el compost no es solo un abono natural, sino que también favorece la productividad de la tierra sin contaminarla con químicos dañinos". Esto es especialmente relevante en entornos urbanos, donde la disponibilidad de espacios verdes y la calidad del suelo pueden ser limitadas.

A nivel comunitario, el compostaje puede fomentar un sentido de pertenencia y responsabilidad ambiental. Iniciativas de compostaje comunitario pueden fortalecer los lazos sociales y promover la educación ambiental. Como indica Geisel (2009), "el compostaje es bueno por varias razones: Ahorra agua al ayudar a mantener la tierra húmeda y reducir la escorrentía. Beneficia al medio ambiente a través del reciclaje de materiales orgánicos y la conservación del espacio de verederos" (Geisel, 2009).

6. CONCLUSIONES

El compostaje automatizado aborda los desafíos de gestión de residuos orgánicos y promover la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, su implementación a gran escala se enfrenta a diversas barreras que requieren atención. Los costos iniciales elevados, la falta de conciencia pública, la complejidad técnica y la necesidad de infraestructura adecuada son algunos de los principales obstáculos. Además, la contaminación de los residuos y la resistencia al cambio pueden dificultar la transición hacia prácticas de gestión de residuos más sostenibles. Para superar estos desafíos, es fundamental invertir en investigación y desarrollo, promover políticas públicas favorables, educar a la población sobre los beneficios del compostaje y fomentar la colaboración entre diferentes actores. Al abordar estos aspectos de manera integral, se puede acelerar la adopción del compostaje automatizado y contribuir a la construcción de ciudades más sostenibles y resilientes.

7. REFERENCIAS

Chen, Y., Li, X., Cheng, Z. & He, Y. (2022) 'Moisture dynamics in composting systems: Implications for process efficiency and environmental performance', *Environmental Science & Technology*, Vol. No. 56.

Docampo, R. (2013) 'Compostaje y compost', *Revista Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria*, Vol. No. 35.

Food and Agriculture Organization (2022) *El estado mundial de la alimentación y la agricultura 2022: Aprovechamiento de la automatización en la agricultura para transformar los sistemas agroalimentarios*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Geisel, P. & Seaver, D. (2009) *El compostaje es bueno para su jardín y el medio ambiente*. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources. Publicación No. 8367-S.

Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y. & Shen, Y. (2023) 'Aeration strategies in composting systems: A critical review on process optimization and environmental impacts', *Bioresource Technology*, Vol. No. 214.

Martínez-Blanco, J., Lazcano, C., Christensen, T.H., Muñoz, P., Rieradevall, J., Møller, J. & Boldrin, A. (2021) 'Compost as a multifunctional soil amendment: Effects on soil quality, crop productivity, and environmental sustainability', *Soil Biology and Biochemistry*, 158, pp. 521-534.

Pachauri, R.K. & Meyer, L.A. (2014) *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: IPCC.

Ryckebøer, J., Mengaert, J., Coosemans, J., Deprins, K. & Swings, J. (2021) 'A review on the microbial ecology of composting processes', *Bioresource Technology*, Vol. No. 287.

Sánchez-Monedero, M.A., Cayuela, M.L., Sánchez-García, M., Vandecasteele, B., D'Hose, T., López, G. & Mondini, C. (2021) 'Temperature dynamics and pathogen inactivation during composting: A comprehensive review', *Waste Management*, Vol. No. 121.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2022) *Programa Nacional de Prevención y Gestión Integral de Residuos*. Reporte.

Sharma, A., Gupta, V., Kumar, R. & Singh, A. (2023) 'Global methane emissions from waste management: A comprehensive analysis and future projections', *Nature Climate Change*, Vol. No. 13.

Zhang, L. & Sun, X. (2022) 'Optimization of carbon to nitrogen ratio for enhanced composting efficiency: A comprehensive review', *Waste Management*, Vol. No. 129.





EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

Gerardo Galileo Reyes Hernández, Gloria Lilia Osorio Gordillo

Por su destacada participación con la presentación del Artículo
en el área Ciencias de la Ingeniería, eje estratégico Agentes Tóxicos y Procesos Contaminantes titulado:
Reducción de residuos vegetales en vertederos mediante técnicas de compostaje.
En el marco del 3er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencias Aplicadas (CITCA), celebrado en el
Tecnológico Nacional de México, campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
(TecNM/CENIDET), del 19 al 22 de noviembre de 2024

Cuernavaca, Morelos, 22 de noviembre de 2024



CITCA53524
<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

LORENZO O. HERNÁNDEZ
DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

ALICIA MARTÍNEZ REBOLLAR
COORDINADORA GENERAL
III CITCA

Sello Digital:

Pz10nL7fKBgRg7xD7xjhJWBh7H39rahjxhvndUKZVWztsuYE8pKP3xRJwX11Pxe4EBUU9GPPutsr4GbqREZKk1
jKT9Zusc7QloG88AqXyWbxWHT4xQFmSiAQh+rOANMk/WUBhANiXjJmOr+OT8nwasB+wD/cUqUg7yYwT8sTyHCE
RdLUZYUK179aOii1PbmNHwt rphRA7zHHazLKeOH8wOFYSzPveosTD4UuuGj4v7pV0mR6vpBNHF55TswVKBd05
R3vnnPi/+jQUYMzixAbZqAywPJde+wV5Cma+cV0aGbJnGRqVdtbLnWuIfqHQz9ijJHTWnHKnQL9VScqNG+9A==

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

CITCA
3er. CONGRESO INTERNACIONAL
DE TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA





EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

Gerardo Galileo Reyes Hernández

Por su destacada participación con la exposición del Artículo
en el área Ciencias de la Ingeniería, eje estratégico Agentes Tóxicos y Procesos Contaminantes,
titulado:

Reducción de residuos vegetales en vertederos mediante técnicas de compostaje.
En el marco del 3er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencias Aplicadas (CITCA), celebrado
en el Tecnológico Nacional de México, campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo
Tecnológico (TecNM/CENIDET), del 19 al 22 de noviembre de 2024

Cuernavaca, Morelos, 22 de noviembre de 2024



CITCA69024
<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

LORENZO O. HERNÁNDEZ
DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

ALICIA MARTÍNEZ REBOLLAR
COORDINADORA GENERAL
III CITCA

Sello Digital:

Wt6gON+yP78rznpUJGUUuJ1ebFX1TL0ux00uuhq0MccTQmnyEqvSN46DLsP1AGjCidoBKNyNnLM/2yPVf5IAIC
thCLv39AttvJRLmU5CGhHj00BBmnLzkVAGKnWzvi7cQT8ggj1wKOzAj5M7VpPh14JxQ7LzpVr56qI3DJFMnlEW
mwr570MnMSok4MRc1Jrehw4r+kvDmUvyltc+DnuTQd1N2ihBoZjsZG09g4FxeXBAMNR7MrotUWh21iDdsTPTB
7FxHRcwvfCrUEDN/p5G88jx9wBQCh6cbYuWK6jwLLA/d9trAaCqEk+1UwsjQBVxqihprPa+LN73ffr4II3fA==

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

CITCA
3er. CONGRESO INTERNACIONAL
DE TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA



