



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

AGRÍCOLA Y FORESTAL SUSTENTABLE

TESIS DE MAESTRÍA

**COMPARACIÓN DE LA BIOOXIDACIÓN DE DIFERENTES FORMULACIONES DE
RESIDUOS ORGÁNICOS MEDIANTE LARVAS DE MOSCA SOLDADO NEGRA (*Hermetia
illucens*) COMO ALTERNATIVA DE COMPOSTAJE CON POTENCIAL AGRÍCOLA**

Para obtener el grado de

Maestra en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

PRESENTA

Ing. Diana Aydee Hernández Trejo

Directora

Dra. Eliazar Aquino Torres

Co-Directora

Dra. Margarita Islas Pelcastre

Tulancingo de Bravo, Hgo., México., abril, 2025.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

AGRÍCOLA Y FORESTAL SUSTENTABLE

TESIS DE MAESTRÍA

**COMPARACIÓN DE LA BIOOXIDACIÓN DE DIFERENTES FORMULACIONES DE
RESIDUOS ORGÁNICOS MEDIANTE LARVAS DE MOSCA SOLDADO NEGRA (*Hermetia
illucens*) COMO ALTERNATIVA DE COMPOSTAJE CON POTENCIAL AGRÍCOLA**

Para obtener el grado de

Maestra en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

PRESENTA

Ing. Diana Aydee Hernández Trejo

Asesores

Dra. Mariana Saucedo García

Dr. Jaime Pacheco Trejo

Dr. Alfredo Madariaga Navarrete

Tulancingo de Bravo, Hgo., México., abril, 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Agropecuarias

School of Forestry and Environmental Studies

Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Master's in Sciences and Technology of Agriculture and Forestry

ICAP-MCTAFS/003/2025

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

P R E S E N T E

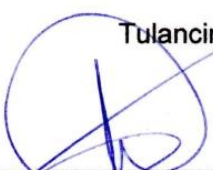
Por este conducto se le comunica que el Comité Revisor asignado a la alumna **Diana Aydee Hernández Trejo**, de la Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable, con número de cuenta **368744**, que presenta el manuscrito de tesis titulado **"Comparación de la bioxidación de diferentes formulaciones de residuos orgánicos mediante larvas de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) como alternativa de compostaje con potencial agrícola"**, ha autorizado la impresión del mismo.

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE

"Amor, Orden y Progreso"

Tulancingo de Bravo, Hgo. a 22 de abril del 2025.


Dr. Sergio Hernández León
Coordinador de la Maestría en
Ciencias y Tecnología Agrícola y
Forestal Sustentable


Dr. Armando Peláez Acero
Director del ICAP



Avenida Universidad Km. 1 s/n, Exhacienda Aquetzalpa
Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México; C.P. 43600
Teléfono: 771 71 72000 ext 2430
maestria_agricola_forestal@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Agropecuarias

School of Forestry and Environmental Studies

Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Master's in Sciences and Technology of Agriculture and Forestry

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DEL ICAP

Actas de la reunión del Comité de Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Apertura:

La reunión ordinaria para evaluar los avances de la tesis intitulada: "Comparación de la bioxidación de diferentes formulaciones de residuos orgánicos mediante larvas de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) como alternativa de compostaje con potencial agrícola", que desarrolla la estudiante Diana Aydee Hernández Trejo.

Asistentes:

Dra. Eliazar Aquino Torres

Dra. Margarita Islas Pelcastre

Dra. Mariana Saucedo García

Dr. Alfredo Madariaga Navarrete

Dr. Jaime Pacheco Trejo

A. Revisión de Trabajo de Tesis

Observaciones:

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por **Diana Aydee Hernández Trejo**, comunicando a la estudiante, realizó oportunamente las correcciones, adiciones y/o modificaciones que debería considerar para mejorar su trabajo y poder continuar con el proceso de obtención de grado. La estudiante atendió de forma conveniente las sugerencias del comité.

B. Acuerdos

En esta fecha, se comunica atentamente que el comité conformado por los profesores firmantes, otorgamos nuestra autorización para que la estudiante imprima su trabajo final de tesis, y continúe con los trámites necesarios para la obtención del grado de maestría respectivo.

ATENTAMENTE

"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"

Tulancingo de Bravo, Hidalgo a 22 de abril de 2025

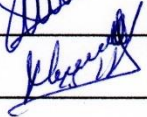
Dra. Eliazar Aquino Torres

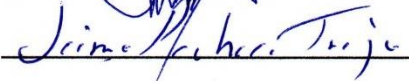
Dra. Margarita Islas Pelcastre

Dra. Mariana Saucedo García

Dr. Alfredo Madariaga Navarrete

Dr. Jaime Pacheco Trejo



Mariana S.G.



Avenida Universidad Km. 1 s/n, Exhacienda Aquetzalpa
Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México; C.P. 43600
Teléfono: 771 71 72000 ext 2430
maestria_agricola_forestal@uaeh.edu.mx



www.uaeh.edu.mx

Índice

Resumen.....	XII
Abstract.....	XIII
1. Introducción.....	1
2. Marco teórico	3
2.1 Compostaje	3
2.1.1 Microorganismos en el proceso de compostaje	3
2.1.2 Fases del compostaje	4
2.1.3 Vermicompostaje.....	6
2.1.4 Beneficios de los métodos de compostaje	7
2.2 Mosca soldado negra (<i>Hermetia illucens</i>).....	8
2.1.5 Ciclo de vida de la mosca soldado negra.....	8
2.2.2. Condiciones óptimas para el desarrollo de larvas.....	11
2.3 Descomposición de la materia orgánica por <i>Hermetia illucens</i>	13
2.2 Tratamiento de residuos mediante larvas de mosca soldado negra.....	14
2.4 Parámetros físicos y químicos como indicadores de calidad en una composta	15
2.4.1 Parámetros físicos	15
2.4.2 Parámetros químicos	16
2.4.3 Norma jurídica mexicana	18
3. Justificación	19
4. Objetivos.....	20
4.1. Objetivo general.....	20
4.2. Objetivos específicos.....	21
5. Hipótesis	21

6.	Materiales y métodos.....	21
6.1	Sitio del experimento	21
6.2	Obtención de larvas de mosca soldado negra	21
6.3	Formulación de sustratos.....	22
6.4	Cálculo de la eficiencia de reducción de los residuos	25
6.5	Análisis de los parámetros fisicoquímicos del frass	26
6.5.1	Parámetros químicos	26
6.5.2	Parámetros físicos	29
6.6	Determinación de la actividad microbiológica	30
6.7	Diseño experimental.....	32
7.	Resultados	32
7.1	Reducción de los residuos y peso de las larvas	32
7.2	Parámetros de acuerdo con la Norma Mexicana	33
7.3	Cinética de pH y C.E en el proceso de biooxidación	35
7.4	Potencial Redox (Eh).....	37
7.5	Análisis de macro y micronutrientes de los sustratos	37
7.6	Análisis microbiológico.....	39
8.	Discusión de resultados	40
8.1	Eficiencia de reducción de los residuos por <i>H. illucens</i> y peso de las larvas	40
8.2	Calidad de las formulaciones degradadas por <i>H. illucens</i>	41
8.3	Contenido de macro y micronutrientes de las formulaciones degradadas por <i>H. illucens</i>	42
8.4	Estimación de la fase de biooxidación de acuerdo con parámetros físicos, químicos y microbiológicos	43
9.	Conclusiones.....	45

10. Bibliografía	46
------------------------	----

Lista de Figuras

Figura 1. Fases del compostaje y sus cambios durante el proceso de degradación. Fuente: Anda-Trasviña et al. 2021.....	5
Figura 2. Adulto de mosca soldado negra.....	9
Figura 3. Ciclo de vida de la Mosca Soldado Negra (<i>H. illucens</i>). Fuente: Elaboración propia.....	10
Figura 4. Mosca soldado negra. a) Larvas; b) Prepupa.	11
Figura 5. Diagrama de Pourbaix de distintas especies de nitrógeno en una solución de 100 μM a 25 °C en función del Eh y el pH. Fuente: Husson (2013).....	17
Figura 6. Obtención de larvas. a) Criadero de MSN en la UAQ campus Amazcala, UAQ; b) LMSN de 7 días alimentadas con dieta Gainesville.	22
Figura 7. Calculadora de relación C/N desarrollada por Richard y Trautmann (1996) de la universidad de Cornell, NY.	24
Figura 8. Adición de larvas de <i>H. illucens</i> . a) Conteo de 500 larvas para cada tratamiento formulado; b) Sustratos formulados con la adición de las LMSN.	24
Figura 9. Proceso de separación y secado de los sustratos a) Separación de larvas de los sustratos mediante un tamiz de 2mm; b) secado de los tratamientos a temperatura ambiente.	25
Figura 10. Medición de voltaje de los tratamientos para la evaluación del Eh mediante el equipo Oakton 510.	27
Figura 11. Determinación de microorganismos a) preparación de medios de cultivo para hongos, bacterias y actinomicetos; b) diluciones seriadas para la identificación de microorganismos; c) tinción de medio para la evaluación de actividad celulolítica.	31
Figura 12. Porcentaje de eficiencia de reducción de los tratamientos en peso fresco..	32
Figura 13. Peso promedio de 50 larvas en gramos en los distintos tratamientos..	33
Figura 14. Cinética de pH durante la fase larvaria.....	36
Figura 15. Cinética de C.E durante la fase larvaria.....	36
Figura 16. Potencial Redox Eh(V) en los tratamientos evaluados. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) (prueba de Tukey) entre los tratamientos, los valores representan el promedio de tres observaciones.....	37

Lista de Tablas

Tabla 1. Especificaciones fisicoquímicas de calidad establecidos en la NMX-AA-180-SCFI-2018 para lombricomposta.....	19
Tabla 2. Porcentaje en peso de los componentes de las formulaciones utilizados para la degradación y alimentación de larvas de mosca soldado negra (<i>H. illucens</i>) ajustados a una relación C/N 30.....	23
Tabla 3. Medios de cultivo y días de incubación para el conteo de hongos, bacterias y actinomicetos.....	30
Tabla 4. Medios de cultivo, días de incubación, indicadores y diluciones utilizadas para grupos microbianos con actividades específicas.....	31
Tabla 5. Parámetros físicos finales de los residuos degradados por las larvas de mosca soldado negra, temperatura y humedad con valores de referencia de la norma NMX-AA-180-SCFI-2018*.....	34
Tabla 6. Comparación de los parámetros químicos de los tratamientos con los valores de referencia para lombricomposta en la norma NMX-AA-180-SCFI-2018*.....	35
Tabla 7. Porcentaje de macronutrientes en los sustratos tratados con LMSN.....	38
Tabla 8. Concentración de micronutrientes en los tratamientos con LMSN.	38
Tabla 9. Unidades Formadoras de Colonias de hongos, bacterias y actinomicetos en los tratamientos al final de la etapa larvaria.	39
Tabla 10. Determinación cualitativa de grupos microbianos en los tratamientos al final de la etapa larvaria.....	40

Lista de Abreviaturas

RO: Residuos Orgánicos

MSN: Mosca Soldado Negra

LMSN: Larvas de Mosca Soldado Negra

CE: Conductividad eléctrica

MO: Materia orgánica

COT: Carbono Orgánico Total

Eh: Potencial Redox

UFC: Unidades Formadoras de Colonias

AFV: Aserrín, Frutas y Verduras

AFVB: Aserrín, Frutas y Verduras y estiércol de Borrego

AFVG: Aserrín, Frutas y Verduras y Gallinaza

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo incondicional de quienes han estado a mi lado en este camino.

En primer lugar, quiero agradecer a mis hermanos Roberto y Laura, quienes siempre han creído en mí, han apoyado mis ideas sin dudar de mí y por ser mi mayor ejemplo en esta vida.

A mis padres, por su amor incondicional, su paciencia y por inculcarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mis amigos, Pili, Néstor, Alexandra y Álvaro por acompañarme en este viaje, por su comprensión, cariño y contención en los momentos de estrés, por hacer del laboratorio un lugar seguro, ameno y divertido. Su apoyo y compañía fueron fundamentales en este proceso.

A mis directoras, Dra. Eliazar y Dra. Margarita por su apoyo, orientación, paciencia y sugerencias que enriquecieron el desarrollo de este trabajo y mi formación académica.

También me quiero agradecerme a mí por confiar en mí, por no rendirme y por llevar a cabo un proyecto que surgió de la curiosidad de saber más sobre aquellas larvas que un día por casualidad encontré en mi composta.

Finalmente agradezco al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) ahora SECIHTI por la beca otorgada con el No. De CVU 1269622.

Resumen

En México se generan 327.3 millones de megagramos de residuos orgánicos al año, más del 90% de estos residuos no son tratados, lo que provoca daños al medio ambiente generando focos de infección para los seres vivos. Una nueva tecnología para la gestión de los residuos orgánicos que cumple con los principios de la economía circular y genera productos con usos alternativos es el uso de las larvas de mosca soldado negra (LMSN) (*Hermetia illucens*).

En este estudio, se emplearon LMSN para degradar distintos residuos orgánicos mediante tres formulaciones: (1) AFV: aserrín, frutas y verduras, (2) AFVB: aserrín, frutas, verduras y estiércol de borrego y (3) AFVG: aserrín, frutas, verduras y estiércol de gallina. Los tratamientos se ajustaron a una relación inicial C/N 30 para evaluar su eficiencia de reducción. La calidad de los residuos degradados (frass) se evaluó conforme a la norma mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018, que establece métodos para el tratamiento de los residuos orgánicos, así como los parámetros de calidad de los productos finales. Asimismo, se analizó el contenido de macro y micronutrientes de las formulaciones y se estimó la fase de biooxidación del proceso de degradación, considerando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Los tratamientos mostraron una eficiencia de reducción de los residuos superior al 65% y cumplen parcialmente con los parámetros establecidos en la norma NMX-AA-180-SCFI-2018. En cuanto al contenido de macro y micronutrientes, las formulaciones con estiércoles superaron a la AFV, siendo AFVG la que presentó porcentajes superiores en la mayoría de macro y micronutrientes. Por otro lado, con base a las características fisicoquímicas: temperatura, humedad, pH, conductividad eléctrica (CE), potencial redox, materia orgánica (MO), relación C/N, carbono orgánico total (COT) y microbiológicas, se considera que el proceso de biooxidación de los tratamientos con LMSN presenta características propias de una fase mesófila. La actividad microbiana en los tratamientos sugiere actividad amonificante y nitrificante.

De acuerdo con los resultados, el uso de LMSN puede representar una tecnología alternativa, rápida y eficiente para el aprovechamiento de los residuos orgánicos. El tratamiento con estiércol de gallina (AFVG) tuvo mayor cantidad de la mayoría de los nutrientes que sugiere su uso potencial como abono. Sin embargo, se requiere de un postratamiento que garantice su estabilidad y madurez.

Palabras clave: *Hermetia illucens*, residuos orgánicos, formulaciones, normativa, compostaje.

Abstract

In Mexico, 327.3 million mega grams of organic waste are generated each year. More than 90% of this waste is not processed, causing damage to the environment and generating sources of infections for living beings. A new technology for organic waste management that complies with the principles of the circular economy and generates different products with alternative uses is the use of black soldier fly (*Hermetia illucens*) (LMSN).

In this work, LMSN was used to degrade different organic wastes by three different formulations: (1) AFV (sawdust, fruits and vegetables), (2) AFVB (sawdust, fruits, vegetables and sheep manure) and (3) AFVG (sawdust, fruits, vegetables and chicken manure). The treatments were adjusted to an initial C/N 30 ratio. to evaluate their reduction efficiency. In addition, the quality of frass was evaluated according to the Mexican standard NMX-AA-180-SCFI-2018, which establishes methods for the treatment of organic waste, as well as the quality parameters of the final products. The waste generated by LMSN in Mexico lacks legal standards to assess their quality. Also, the biooxidation phases during the waste degradation process were estimated by considering physicochemical and microbiological parameters.

The results of the treatments indicate a waste reduction efficiency higher than 65%. The LMSN treatments are partially satisfied with the parameters established in the NMX-AA-180-SCFI-2018 standard and according to N, P and K content, they can be

considered as soil improvers. Treatments with manures (AFVB and AFVG) presented a higher percentage of macro and micronutrients. In addition, based on the physicochemical (temperature, humidity, pH, EC, OM, C/N ratio, TOC) and microbiological parameters, it is concluded that the biooxidation process of the LMSN treatments presents characteristics typical of a mesophilic phase. Furthermore, according to microbial activity, there was an ammonifying and nitrifying activity in the treatments.

According to the results, it was determined that chicken manure treatment (AFVG) represents a viable composting option with agricultural potential. Also, using LMSN can represent alternative, fast and efficient technology for the treatment of organic waste. However, a post-treatment is required to ensure the quality, stability, and maturity of the frass.

Keywords: *Hermetia illucens*, organic waste, formulations, legal standards, composting.

1. Introducción

El aumento de la población, la urbanización y las actividades cotidianas han provocado un incremento en la generación de residuos sólidos urbanos (RSU). Estos residuos sólidos urbanos incluyen una parte sólida como materiales de metal, cartón, vidrio o plásticos y otra de origen biológico conocida como residuos orgánicos (RO) formados por residuos vegetales derivados de la preparación de alimentos y estiércoles de animales, entre otros (Paritosh *et al.* 2018).

Las prácticas ineficientes como el uso de vertederos abiertos para el tratamiento de estos residuos orgánicos contribuyen al calentamiento global al liberar gases de efecto invernadero, contaminan el suelo y los cuerpos de agua debido a la lixiviación de residuos favoreciendo a la propagación de enfermedades entre los seres vivos (Anda-Trasviña *et al.* 2021).

Las inadecuadas o escasas prácticas de manejo y tratamiento de los RO representa el principal desafío en la gestión de estos residuos, lo que dificulta su aprovechamiento y aumenta los costos de manejo. Ante esta problemática es necesario la aplicación de métodos para gestionar los residuos orgánicos, que sean económicamente viables y amigables con el medio ambiente (Anda-Trasviña *et al.* 2021; Basri *et al.* 2022).

Uno de los métodos más utilizados para la degradación de RO es el compostaje, el cual disminuye su volumen entre un 40 a 60% (Anda-Trasviña *et al.* 2021). El compostaje es el proceso biológico de descomposición de la materia orgánica en un ambiente predominantemente aerobio, donde hongos, bacterias, actinomicetos y otros microorganismos descomponen la materia orgánica en sustancias estables y aprovechables para las plantas (Bernal *et al.* 2009).

Otra opción para la degradación y estabilización de los RO es el vermicompostaje. Este proceso lo realiza la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) e implica la ingesta y descomposición de la materia orgánica en colaboración con microorganismos, reduciendo el tamaño de las partículas y acelerando su descomposición (Aira *et al.*

2009). Al igual que el compostaje tradicional los RO reducen su volumen inicial hasta un 40% (Anda-Trasviña *et al.* 2021).

Las técnicas de compostaje suelen ser procesos lentos de degradación, que puede durar meses (3 a 6) si no se les facilita las condiciones ambientales adecuadas (Román *et al.* 2013; González *et al.* 2016). El contenido de nutrientes de la composta depende de varios factores como el tipo de residuo y su fuente de procedencia (Drózd *et al.* 2020).

Los productos derivados del compostaje son utilizados como abonos orgánicos que pueden mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo como la capacidad de intercambio catiónico, textura, incremento de la materia orgánica y una mayor retención de humedad (Nieto *et al.* 2021).

En la última década ha surgido un método alternativo para la reducción de los RO mediante el uso de larvas de la mosca soldado negra (LMSN) *Hermetia illucens* (Čičková *et al.* 2015; Gold *et al.* 2018). Las moscas soldado negra son insectos saprófagos que en su etapa larvaria son voraces consumidores de materia orgánica en descomposición, logrando un rápido compostaje de los residuos, este proceso podría contribuir a mitigar la problemática en la gestión de residuos orgánicos (Song *et al.* 2021; Beesigamukama *et al.* 2021).

Las LMSN son capaces de consumir una amplia variedad de RO incluyendo estiércoles, residuos de cocina, residuos municipales, incluso de animales en descomposición (Čičková *et al.* 2015). Estas larvas tienen la capacidad de reducir los RO, en un corto periodo de tiempo (5 semanas) bajo condiciones ideales o controladas (Salomone *et al.* 2017).

Mediante esta bioconversión se tiene la ventaja de generar dos productos: (1) biomasa larval rica en proteínas y lípidos utilizada para la alimentación animal de aves, peces, cerdos e incluso como alimento para mascotas (Lopes *et al.* 2022) y (2) el residuo excretado por las larvas (frass), que consiste en exoesqueletos de las larvas, residuos del sustrato en el cual se desarrollan y una población microbiana que lleva a cabo una

fermentación que puede modificar benéficamente la microflora del suelo (Schmitt y de Vries, 2020).

El frass, tiene una composición similar a una composta inmadura y tiene el potencial para ser utilizado en la agricultura como abono orgánico (Basri *et al.* 2022), ya que estos residuos pueden contener cantidades significativas de N, P, K (Schmitt y de Vries, 2020).

No obstante, la composición final del frass depende de los sustratos utilizados para la alimentación de las larvas (Elissen *et al.* 2023). Por ello, es necesario realizar más investigaciones sobre los sustratos de alimentación y analizar su composición física, química y microbiológica de los frass generados. El objetivo de este trabajo fue comparar la degradación de diferentes formulaciones de RO mediante el uso de LMSN como una alternativa de compostaje.

2. Marco teórico

2.1 Compostaje

El compostaje se define como un proceso biooxidativo de los residuos orgánicos en condiciones controladas de temperatura, humedad, relación C/N y aireación. Durante este proceso, intervienen microorganismos esenciales que, a través de sistemas enzimáticos complejos liberan nutrientes y energía. Estos microorganismos utilizan el nitrógeno y el carbono disponibles de los RO para producir su propia biomasa en diferentes fases (mesófila, termófila, enfriamiento y maduración) del proceso de compostaje (Moreno-Casco y Moral-Herrero, 2007; Azim *et al.* 2018).

2.1.1 Microorganismos en el proceso de compostaje

Las bacterias, hongos y actinomicetos son los principales microorganismos activos en el proceso de compostaje. Las bacterias son los microorganismos con mayor abundancia en el proceso, se encargan de la hidrólisis de moléculas poliméricas para la producción de moléculas más simples. Se estima que las bacterias contribuyen entre el 80 y 90% de la actividad microbiana total durante el compostaje. Algunos géneros presentes son

Rhizobium, *Nitrosomonas*, *Streptococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter* y *Aliccaligenes*. Estas bacterias se desarrollan de manera óptima en un rango de pH entre 6 y 7.5 (Stoffella y Kahn, 2000; Velasco-Velasco *et al.* 2021).

Los hongos desempeñan un papel fundamental en la descomposición carbohidratos complejos como la celulosa y almidón, su presencia es menos abundante en comparación con las bacterias. Estos microorganismos predominan en las etapas finales de descomposición y contribuye significativamente en la formación de humus. Los hongos se desarrollan óptimamente en un rango de pH entre 5 y 8 (Velasco-Velasco *et al.*, 2021). Algunos géneros de hongos presentes en el proceso de compostaje son *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Trichoderma* y *Chaetomoniun* (Stoffella y Kahn, 2000).

Asimismo, los actinomicetos son un subgrupo especializado de bacterias saprófitas con una morfología similar a los hongos. Los actinomicetos son abundantes y cosmopolitas, se encuentran en ríos, suelos y en estiércol de animales, en la superficie del suelo especialmente en suelos alcalinos. Se destacan por su capacidad de degradar celulosa, solubilizar lignina y tolerar mayor temperatura y pH que los hongos. Además, son responsables del olor típico del suelo húmedo por la producción de un metabolito llamado geosmina (Dávila *et al.* 2013). En el proceso de compostaje se han identificado géneros como *Nocardia*, *Streptomyces*, *Thermoactinomyces* y *Micromonospora* (Velasco-Velasco *et al.* 2021).

La abundancia de los microorganismos (hongos, bacterias y actinomicetos) dependerá de las condiciones nutricionales del sustrato, la operación del proceso y las condiciones ambientales (Stoffella y Kahn, 2000).

2.1.2 Fases del compostaje

Durante el proceso de compostaje, las condiciones de los residuos orgánicos son modificadas por los microorganismos, dando lugar a dos fases globales: la fase biooxidativa y la fase de maduración (Fig. 1). La fase biooxidativa es aquella donde

predominan las reacciones enzimáticas degradativas de las moléculas orgánicas; se divide en las fases mesófila y termófila (Moreno-Casco y Moral-Herrero., 2007).

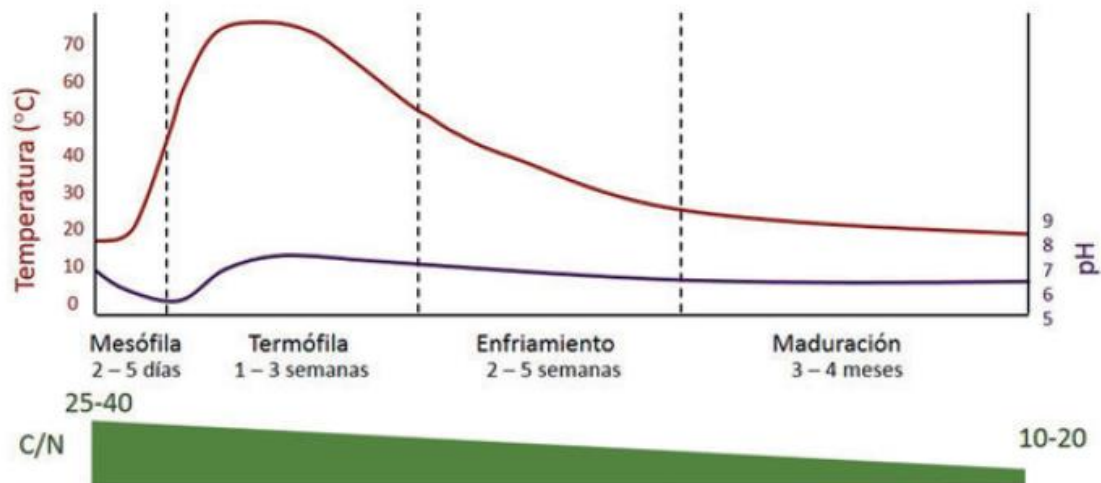


Figura 1. Fases del compostaje y sus cambios durante el proceso de degradación. Fuente: Anda-Trasviña *et al.* 2021.

Al comenzar la actividad microbiana se genera calor aumentando la temperatura del material durante las diferentes fases del compostaje.

La fase mesófila es la parte más activa del compostaje, caracterizada por una temperatura mayor a 25 °C, pero menor a 40 °C, donde se degradan compuestos orgánicos simples y el pH experimenta amplias variaciones. En esta etapa predominan microorganismos como las bacterias, que destacan por su metabolismo oxidativo y fermentativo, alcanzando niveles máximos de actividad. La actividad metabólica de los microorganismos en esta fase provoca un incremento rápido de la temperatura, ocasionando una transición de mesófila a termófila, donde las temperaturas superan los 40 °C (Azim *et al.* 2018; Velasco-Velasco *et al.* 2021).

Mediante la fase termófila, el aumento de temperatura reduce la biodiversidad permitiendo la proliferación de microorganismos termotolerantes. Los microorganismos sensibles a las altas temperaturas, incluidos patógenos y parásitos, son inhibidos

durante esta etapa. Durante esta fase, los nutrientes se vuelven más asimilables lo que favorece la aparición de actinomicetos. Estos microorganismos comienzan a metabolizar proteínas, lo que incrementa la liberación de aminoácidos que provocan la alcalinización del medio. Cuando las temperaturas superan los 60 °C, la actividad microbiana disminuye generando una caída de la temperatura, dando paso a la fase de enfriamiento (Stoffella y Kahn, 2000; Azim *et al.* 2018; Moreno-Casco y Moral-Herrero, 2007).

Durante la fase de enfriamiento la temperatura es más estable y baja de todo el proceso, se caracteriza por el crecimiento de una nueva comunidad mesófila y de tener un pH cercano a la neutralidad. En esta comunidad predominan hongos, actinomicetos y menor número de bacterias, estas últimas continúan realizando actividades como la oxidación de la materia orgánica, del hidrógeno, amonio, nitrito y sulfuros importantes para la maduración del compost (Moreno-Casco y Moral-Herrero, 2007; Velasco-Velasco *et al.* 2021).

Finalmente, en la fase de maduración se llevan a cabo reacciones de condensación y polimerización de los residuos (Moreno-Casco y Moral-Herrero, 2007), existe una menor actividad microbiana y tiene una textura de tierra suelta, ligeramente húmeda, con un olor agradable y con una temperatura similar al ambiente (Anda-Trasviña *et al.* 2021).

La madurez del compost se define como el estado en el cual el material ha alcanzado una estabilidad biológica y carece de efectos fitotóxicos sobre las plantas. Esta condición está vinculada con la tasa de descomposición de los residuos y con la ausencia de compuestos orgánicos fitotóxicos, tales como el amoniaco, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos hidrosolubles. El grado de madurez puede evaluarse a través de la respuesta vegetal (Moreno-Casco y Moral-Herrero, 2007).

2.1.3 Vermicompostaje

Otro método para la biooxidación de la materia orgánica es el vermicompostaje, proceso mediado por la acción de diferentes especies de lombrices (*Eisenia fetida*, *Perionyx*

excavates y *Eudrilus eugeniae*) en conjunto con microorganismos bajo condiciones aerobias y mesófilas (El- Sayed, 2024).

En este proceso los microorganismos degradadores aerobios (hongos, bacterias y actinomicetos), junto con otros microorganismos específicos como los amilolíticos, celulolíticos, amonificantes y nitrificantes son los responsables de la degradación bioquímica de la materia orgánica (Domínguez *et al.* 2010; Quintero, 2014). Las lombrices desempeñan un papel central en la transformación de los residuos orgánicos en un producto estabilizado. Su acción inicia con la fragmentación mecánica de los residuos, lo que incrementa la superficie disponible para la acción de los microorganismos. A través de su sistema digestivo, las lombrices secretan enzimas y albergan una microflora intestinal compuesta por bacterias aeróbicas y anaeróbicas, que facilitan la descomposición química de la materia orgánica. Este proceso da lugar a un sustrato más homogéneo y biológicamente activo. Así, las lombrices no solo contribuyen a la descomposición directa de los residuos, sino que también promueven condiciones óptimas para el desarrollo de comunidades microbianas que continúan con la mineralización y estabilización del material (Villegas-Cornelio y Laines, 2017).

A través de estos métodos de descomposición, los desechos orgánicos suelen degradarse lentamente si no se brindan las condiciones ambientales adecuadas. En una vermicomposta el tiempo de descomposición puede tener una duración de 2 a 9 meses (Roman *et al.* 2013; González *et al.* 2016).

2.1.4 Beneficios de los métodos de compostaje

El compostaje permite transformar materiales orgánicos como: restos de comida, vegetales, fruta, residuos de jardinería, madera, estiércol, entre otros los cuales comúnmente son desechados en vertederos.

Por medio del compostaje y el vermicompostaje se obtiene materia orgánica degradada que mejora las propiedades físicas y químicas del suelo por lo que Producir y utilizar compost aporta beneficios al medio ambiente, la economía y a las comunidades.

En cuanto a las propiedades químicas, se aportan nutrientes esenciales como N, P, K y micronutrientes, así como el mejoramiento de la capacidad de intercambio catiónico. De igual forma el compost aporta carbono para mantener la biodiversidad de la micro y macrofauna (Anda-Trasviña *et al.* 2021).

En relación con las características físicas, estos métodos de compostaje pueden actuar como mejoradores de suelo al favorecer la estructura y estabilidad de los agregados, promover la retención de humedad y minimizar la pérdida de nutrientes al reducir la escorrentía provocada por el riego y la lluvia, ayudando a prevenir la erosión (Macías Duarte *et al.* 2020).

2.2 Mosca soldado negra (*Hermetia illucens*)

Un método alternativo para la reducción de los residuos es el uso de larvas de mosca soldado negra (*H. illucens*), que pueden transformar residuos orgánicos en un rango de 55 a 80% en un corto periodo de tiempo, esto bajo condiciones ideales (Diener *et al.* 2011; Lalander *et al.* 2014; Basri *et al.* 2022).

2.1.5 Ciclo de vida de la mosca soldado negra

Hermetia illucens es un insecto que pertenece al orden de los Dípteros (Fig. 2), de la Familia *Stratiomyidae*, Subfamilia *Hermetiinae*. Moscas nativas de la región tropical y subtropical del continente americano, se encuentran presentes alrededor del mundo entre las latitudes 40°S y 45°N (Caruso *et al.* 2014).

Estas moscas son insectos holometábolos, lo que significa que su desarrollo comprende las fases de embrión, larva, pupa y adulto. Las larvas y adultos tienen morfologías y hábitos de vida contrastantes (Caruso *et al.* 2014).

La mosca en su estado larvario es saprófaga y fotosensible, posee un aparato bucal para su alimentación, que además contribuye a su movimiento corporal. El cuerpo de la larva se compone de 11 segmentos, poseen un color beige o café claro, miden aproximadamente 20 mm de largo y 6 mm de ancho (Caruso *et al.* 2014).

Por otro lado, en el estado adulto posee dos largas antenas, un par de alas bien desarrolladas y tres pares de patas con un tarso blanco/amarillo y miden entre 13 a 20 mm de largo. Los machos y hembras se pueden distinguir por su parte genital. Las hembras poseen un oviducto mientras que los machos tienen un edeago (órgano copulador de los machos) y un par de ganchos que permite agarrar al órgano genital de la hembra (Caruso *et al.* 2014).



Figura 2. Adulto de mosca soldado negra.

Durante el ciclo de vida de las MSN (Fig. 3), las hembras depositan entre 300 a 1000 huevos en un sustrato seco (Caruso *et al.* 2014) en una temperatura mínima de 15 °C y máxima de 40 °C (Chiam *et al.* 2018) y una humedad relativa del 50 a 90% (Singh *et al.* 2022).

Para proteger los huevecillos de los depredadores, estos son depositados en filas apretadas ausentes de luz para prevenir su deshidratación y cercanos a la materia orgánica en descomposición. Los huevos tienen una forma ovoide y miden alrededor de 1 mm de largo, cambian de color de beige a amarillo durante el periodo de incubación que dura aproximadamente de 2 a 4 días a una temperatura de 27 a 29 °C, las larvas recién eclosionadas apenas son visibles y comienzan a alimentarse de una manera voraz

de la materia orgánica disponible; las hembras de MSN mueren poco después de la oviposición (Tomberlin *et al.* 2002; Dortmans *et al.* 2021).

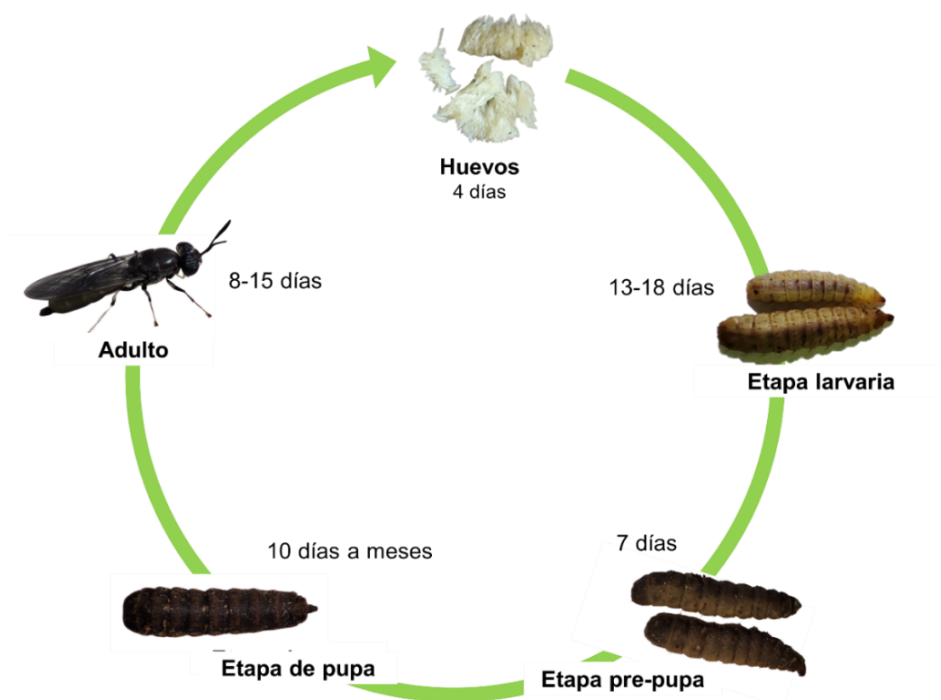


Figura 3. Ciclo de vida de la Mosca Soldado Negra (*H. illucens*). Fuente: Elaboración propia.

A lo largo de la etapa larvaria, la temperatura es un parámetro clave para la supervivencia y desarrollo de la larva; la temperatura óptima para su desarrollo oscila entre los 20 a 30 °C (Caruso *et al.* 2014). Esta etapa tiene una duración aproximada de 18 a 20 días dependiendo de la disponibilidad, calidad y tipo del alimento (Surendra *et al.* 2020).

La etapa larvaria es la única etapa donde este insecto se alimenta; en este periodo almacenan suficientes reservas de grasas y proteína que permiten completar su desarrollo de manera óptima. Las larvas realizan mudas sucesivas que se separan en 5



Figura 4. Mosca soldado negra. **a)** Larvas; **b)** Prepupa.

estadios larvales, los cuales son difíciles de diferenciar a excepción del último estadio que se caracteriza por cambiar de color beige a café oscuro (Caruso *et al.* 2014).

Cuando la larva pasa a estado de prepupa (Fig. 4) cambia de un color café oscuro a uno más intenso, reemplaza su aparato bucal a una estructura en forma de gancho que usa para migrar a un sustrato seco, sombreado y protegido de depredadores para pasar a estado de pupa. Las pupas permanecen inmóviles durante esa etapa que puede tener una duración de 10 días o hasta meses (Surendra *et al.* 2020), su cutícula es rígida y rica en sales de calcio (Caruso *et al.* 2014).

Los machos emergen antes que las hembras y necesitan amplias áreas para su vuelo nupcial. Un adulto de MSN vive aproximadamente de 5 a 14 días, su periodo de vida depende de los nutrientes que adquirió en su etapa larvaria y la disponibilidad de agua en el ambiente (Tomberlin *et al.* 2002). En esta etapa la cantidad de luz natural y la temperatura (25 a 30 °C) son importantes para su desarrollo (Dortmans *et al.* 2021).

2.2.2. Condiciones óptimas para el desarrollo de larvas

Los adultos de MSN no necesitan alimentarse, viven de las reservas de energía obtenidas durante su desarrollo larval; sin embargo, pueden consumir néctar y agua

para alargar su periodo de vida hasta 14 días. Además, los adultos de *H. illucens* no se consideran plagas, no dañan cultivos agrícolas, no causan enfermedades o improductividad en el ganado y no son vectores de enfermedades humanas (Čičková *et al.* 2015).

Después de haber eclosionado las LMSN, el sustrato donde se desarrollan debe estar húmedo, ya que favorece su alimentación (Caruso *et al.* 2014). Dortmans *et al.* (2021) mencionan las siguientes condiciones para el desarrollo óptimo de las LMSN:

2.1.5.1 Condiciones ambientales

La temperatura ideal es de 20 a 30 °C. Si la temperatura es alta las larvas saldrán del sustrato en busca de un lugar más fresco. Si la temperatura es baja, su metabolismo será más lento por lo cual se alimentará menos y se desarrollará lentamente.

Las larvas son fotosensibles por lo cual buscan ambientes ausentes de luz. Si su fuente de alimento está expuesto a la luz del sol, éstas se adentrarán a una capa más profunda.

2.1.5.2 Contenido de humedad del sustrato

La fuente de alimento debe estar húmeda, con un contenido de agua entre 60% y 90% para que las larvas puedan ingerir su alimento.

2.1.5.3 Requerimientos de los sustratos

Sustratos ricos en proteínas y carbohidratos fáciles de asimilar favorecen al crecimiento de la larva. Investigaciones recientes indican que las larvas pueden consumir fácilmente el sustrato si ya ha pasado por pretratamiento, ya sea por una reducción de partícula o por una descomposición bacteriana o fúngica.

2.1.5.4 Tamaño de partícula del sustrato

Las larvas no poseen un aparato bucal masticador, por lo cual, si el sustrato posee partículas pequeñas o incluso si se encuentra de forma acuosa, facilitará el acceso a los nutrientes para la larva.

2.3 Descomposición de la materia orgánica por *Hermetia illucens*

Las larvas se alimentan de residuos a través de su aparato bucal que absorbe sólidos y líquidos sin un tamaño específico de partícula; la descomposición de la dieta se lleva a cabo en el intestino, particularmente en el intestino medio (Terra *et al.* 1988).

Existen pocos estudios sobre la función biológica del microbiota intestinal de la MSN, así como procesos fisiológicos y bioquímicos (Zhineng *et al.* 2021). Sin embargo, la MSN tiene un orden filogenético similar a otras larvas de moscas bien estudiadas, por lo que se sugiere que su sistema digestivo se desarrolló de manera similar al de los insectos relacionados filogenéticamente (Gold *et al.* 2018).

Adicionalmente, las LMSN presentan un microbiota intestinal con funciones importantes para su desarrollo (Gold *et al.* 2018). La microbiota intestinal de las LMSN puede llegar a tener más de 2,300 géneros y 11,000 especies de bacterias y hongos (Zhineng *et al.* 2021). Las bacterias con mayor abundancia son: *Enterococcus*, *Acinetobacter*, *Providencia*, *Enterobacter*, *Myroide*, y géneros de hongos como *Pichia*, *Trichosporon*, *Rhodotorula* y *Geotrichum* (Boccazzi *et al.* 2017; Zhineng *et al.* 2021).

Al igual que otros seres vivos, las moscas necesitan nutrientes que les permitan un óptimo desarrollo, nutrientes obtenidos de biomoléculas como carbohidratos, aminoácidos, proteínas y lípidos (Oliveira *et al.* 2015).

Los carbohidratos son usados por las LMSN como fuente de energía, para la construcción de tejidos, p. ej., el exoesqueleto de los insectos y larvas que está compuesto por quitina.; Los aminoácidos participan en la formación de tejidos, hormonas, enzimas, síntesis de proteínas de transporte; mientras que los lípidos son reservas de energía que proveen de estructura a las membranas celulares y organelos, son importantes para la producción de hormonas (Gold *et al.* 2018).

En la descomposición de la dieta de las moscas usan algunas enzimas importantes, para la hidrólisis de enlaces glucosídicos en carbohidratos incluyen: amilasa, maltasa y glucosidasa; enlaces peptídicos en proteínas como: tripsina, aminopeptidasa y en

enlaces éster en los lípidos: triacilglicerol lipasa, fosfolipasa y fosfatasas (Blahovec *et al.* 2006; Gold *et al.* 2018).

2.2 Tratamiento de residuos mediante larvas de mosca soldado negra

Las LMSN tienen una alta eficiencia en la bioconversión de residuos orgánicos que permite reducir un gran volumen y variedad. Por ejemplo, residuos como el estiércol de animales puede reducirse hasta un 63% en peso húmedo; residuos vegetales 74% en peso húmedo; mientras que los desechos de industria cervecera (bagazo) hasta un 59% también en base húmeda (Gold *et al.* 2018).

Asimismo, residuos orgánicos domésticos el porcentaje de reducción puede ser de hasta 79.9% de materia seca (MS); los residuos de frutas y vegetales pueden tener un porcentaje de reducción de un 60 a 65% de MS; el estiércol de bovinos tiene una reducción entre un 34.4 a 48.8% de MS (Rehman *et al.* 2019; Lalander *et al.* 2020).

Quilliam *et al.* (2020) reportan que la bioconversión por LMSN en 858 kg de estiércol de gallina produce 62.9% (540 kg) de composta y 6.4% (54.9 kg) de biomasa larval. De manera similar, Rehman *et al.* (2017) evaluaron diferentes combinaciones en porcentajes de estiércol de lechería y gallinaza donde la proporción de 100% gallinaza tuvo un porcentaje de reducción del 55.04% de MS y la proporción de estiércol de lechería tuvo un porcentaje de reducción del 43.17% en MS.

Por otro lado, Liu *et al.* (2021) analizaron el impacto de las LMSN en la conversión de residuos alimenticios con aserrín, evaluando parámetros como la madurez, la transformación de nutrientes y la producción de ácidos grasos volátiles. Los tratamientos incluyeron T1, que consistió en la mezcla de aserrín, residuos alimenticios y LMSN en una proporción 6.5:0.5:1.2 (kg en peso fresco) y T2 sin LMSN. Los resultados indicaron que la adición de LMSN redujo el tiempo de compostaje a nueve días y, además, disminuyó la cantidad de materia orgánica, el nitrógeno total y ácidos grasos. Sin embargo, aumento el fosforo y potasio total.

En cambio, Beesigamukama *et al.* (2021) evaluaron el impacto de la relación C/N en la degradación, madurez y niveles de nutrientes específicamente en residuos de cervecería

enmendados con aserrín. Hallaron que el aserrín no afectó significativamente en la degradación y que, mediante un postratamiento de compostaje en pilas, el proceso se redujo en cinco semanas. Además, con una relación C/N de 15 podría generar un compost de calidad.

La composición del sustrato desempeña un papel crucial en todos los parámetros de las LMSN, incluidos el crecimiento, el desarrollo y la composición química de las larvas, además de la composición química del frass (Naser *et al.* 2023).

2.4 Parámetros físicos y químicos como indicadores de calidad en una composta

Existen distintos parámetros para describir la calidad de una composta como: parámetros fisicoquímicos tales como: temperatura, humedad, pH, CE, MO, COT, relación C/N, entre otros (Stoffella y Kahn, 2000; Moreno-Casco y Moral-Herrero., 2007; Azim *et al.* 2018). La estabilidad y la madurez en la degradación de los residuos son fundamentales para garantizar su óptimo aprovechamiento como fertilizante o enmienda para las plantas.

2.4.1 Parámetros físicos

Temperatura

Uno de los factores que influye de manera crítica la velocidad de la descomposición de la materia orgánica durante el proceso de compostaje es la temperatura. Las temperaturas óptimas se encuentran entre 45 y 59 °C. Las temperaturas menores a 20 °C frenan el desarrollo del crecimiento microbiano; por otro lado, si las temperaturas son muy altas inhibe el desarrollo de los microorganismos o provoca su eliminación (Moreno-Casco y Moral-Herrero., 2007).

Humedad

El contenido de humedad en el proceso de compostaje juega un papel importante ya que influye en la actividad metabólica en los microorganismos y disuelve parte de los residuos orgánicos para una mejor degradación microbiana (Xie *et al.* 2023). También, este parámetro indica la estabilización de la materia orgánica. Si los niveles de humedad

superan el 35%, es posible que la materia orgánica no esté completamente estabilizada (Stoffella y Kahn, 2000).

2.4.2 Parámetros químicos

pH y Conductividad Eléctrica

El pH influye en la actividad microbiana y por lo tanto la degradación de los residuos. Valores de pH inferiores a 6 y superiores a 9 la actividad microbiana es limitada y en ambientes alcalinos se incrementan las emisiones de amoníaco (NH_3) (Xie *et al.* 2023). De acuerdo con Azim *et al.* (2018) durante el proceso de compostaje el pH tiende a cambiar, generalmente existen cuatro fases:

Acido génesis (I): el pH disminuye y aparecen ácidos orgánicos en la fase termofílica temprana

Fase de alcalinización (II): el pH y la hidrólisis bacteriana de proteínas incrementa y el nitrógeno orgánico produce amoníaco

Fase de estabilización (III): la relación C/N disminuye. El amoníaco se volatiliza y el nitrógeno es sintetizado por microorganismos para generar compuestos húmicos

Fase estable (IV): el pH se acerca a valores neutros y el compost comienza a madurar. La estabilidad se debe a las reacciones lentas en el proceso de compostaje.

De igual manera la conductividad eléctrica (CE) en el proceso de compostaje estima la cantidad de sales presentes en el medio. Altos contenidos de sales en los residuos degradados afectan el desarrollo de los cultivos (Stoffella y Kahn, 2000).

Potencial Redox (Eh)

El potencial redox (Eh) es un factor que al igual que el pH influyen en la movilidad y presencia de distintos elementos en el suelo, especialmente en los que tienen una gran amplitud en números redox como el N. Mediante el diagrama de Pourbaix del nitrógeno (Fig. 5) se muestran zonas para las distintas formas de nitrógeno (NO_3^- , NH_4^+ , NH_3 , NO_2^-) en una solución acuosa. Las condiciones de oxido-reducción en un sustrato se evalúan midiéndose el Eh en voltios (Husson, 2013).

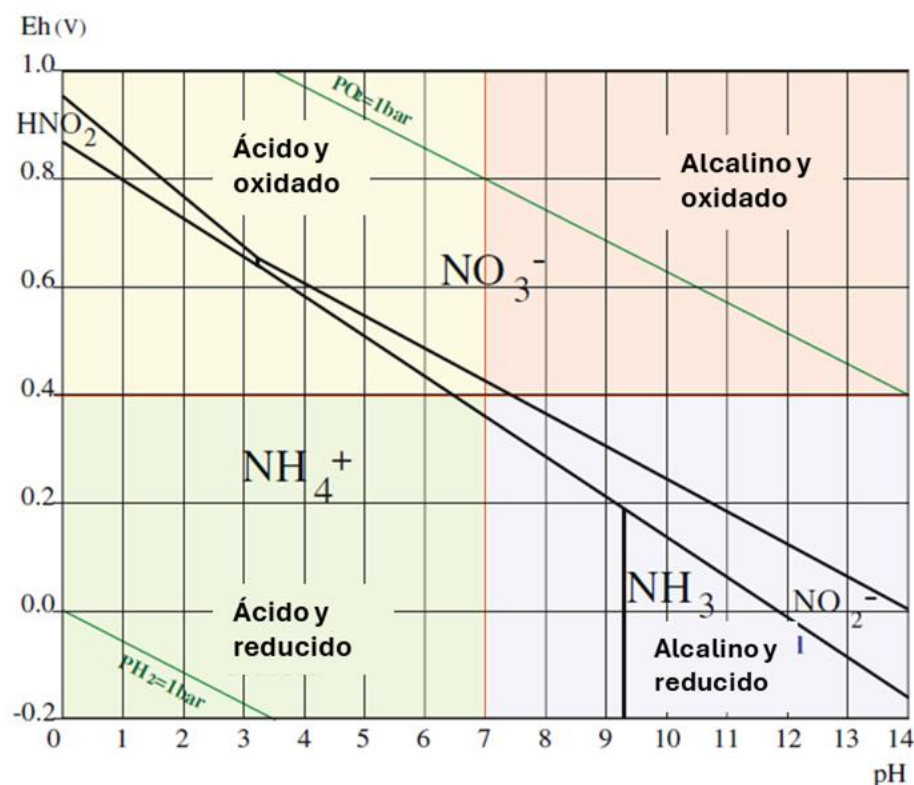


Figura 5. Diagrama de Pourbaix de distintas especies de nitrógeno en una solución de 100 μM a 25 °C en función del Eh y el pH. Fuente: Husson (2013).

Relación C/N

Por otro lado, la relación C/N es un parámetro crucial para la vida microbiana y un parámetro principal en la composición de la materia orgánica. El carbono es utilizado

como fuente de energía para los microorganismos y el nitrógeno lo utilizan para construir estructuras celulares. Al inicio del compostaje la relación adecuada para el óptimo desarrollo de los microorganismos y la degradación de los residuos es en una relación de 30/1 (Anda-Trasviña *et al.* 2021).

La relación C/N inicial afecta no solo afecta a la mineralización de la materia orgánica sino también la amonificación y nitrificación microbiana (Xie *et al.* 2023; Azim *et al.* 2018). Se ha evidenciado que el rango inicial ideal para el compostaje es de 25 a 30 para mantener una actividad microbiana estable (El-mrini *et al.* 2022). Una alta relación C/N hace que el proceso sea lento, mientras que una relación C/N baja provoca emisiones elevadas de amoníaco, una mayor pérdida de nitrógeno y afecta negativamente varias propiedades agroquímicas del compost (Dume *et al.* 2023).

Materia Orgánica

Se le considera materia orgánica a cualquier tipo de materia de origen vegetal o animal que regresa al suelo después de un proceso de descomposición. Estos materiales cambian de una forma orgánica a una inorgánica por medio de microorganismos. Una vez que se alcanza su máxima degradación forman complejos de carbono, altamente estables y de lenta degradación (Román *et al.* 2013).

Carbono Orgánico Total

El carbono orgánico total (COT) indica la concentración de materia orgánica (MO). El COT disminuye durante el compostaje debido a la degradación de sustancias orgánicas por los microorganismos, lo que conduce a su mineralización en forma de dióxido de carbono (Azim *et al.* 2018).

2.4.3 Norma jurídica mexicana

En México la composta producida por las LMSN carece de normas específicas que regulen su producción, madurez y calidad, por lo que es necesario tomar en cuenta parámetros fisicoquímicos establecidos en una norma jurídica permitan la valoración de la composta producida por las LMSN.

La norma mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018 establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales (Tabla 1). Además, especifica los niveles de concentración máxima permitida de elementos traza como el Cu (70-300 mg/kg), Zn (200-500 mg/kg), Cd (0.7-2 mg/kg), entre otros.

Tabla 1. Especificaciones fisicoquímicas de calidad establecidos en la NMX-AA-180-SCFI-2018 para lombricomposta.

Parámetro	Valor
pH	5.5 - 8.5
Conductividad eléctrica (dS/m)	≤ 4
Materia orgánica (%)	20 - 50
Carbono Orgánico Total (%) *	Mínimo 10
Relación C/N	≤ 20
Nitrógeno total (%)	1 - 4
Humedad (%) **	20-40
Temperatura (°C)	25-50

Nota: valores en peso seco; *Valor para una composta; ** sobre base húmeda. Fuente: Secretaría de economía (SE), 2018.

3. Justificación

En la actualidad, el desarrollo de soluciones eficientes y sostenibles para el manejo de residuos orgánicos sigue siendo escaso y limitado. Para el año 2050, se estima la generación de 3.4 billones de megagramos de residuos sólidos urbanos (RSU) en el mundo (Basri et al., 2022). En México, se generan anualmente 44 millones de megagramos de RSU, de los cuales el 46.42% corresponden a residuos orgánicos, y únicamente el 7% de estos son tratados mediante procesos como el compostaje o la biodigestión (CCA, 2017; SEMARNAT, 2020).

La acumulación de residuos orgánicos sin un tratamiento adecuado genera efectos negativos sobre el medioambiente, como la contaminación del suelo, la emisión de gases de efecto invernadero y riesgos para la salud de organismos vivos. Ante este panorama, es fundamental innovar, desarrollar y tecnificar métodos sustentables y eficientes que respondan a las necesidades sociales, medioambientales y económicas actuales.

Una alternativa prometedora para la degradación de residuos orgánicos es el uso de larvas de la mosca soldado negra (*Hermetia illucens*), conocidas por su alta capacidad de reducción de residuos en cortos periodos de tiempo, generando subproductos valiosos como la biomasa larval y el frass. No obstante, la mayoría de las investigaciones se han enfocado en el aprovechamiento de la biomasa larval para alimentación animal, dejando al frass como un subproducto poco explorado.

De acuerdo con el tipo, cantidad de residuo, densidad larval, la calidad y características del frass pueden variar, por lo que es fundamental analizar su composición fisicoquímica y microbiológica para determinar su potencial en el tratamiento y manejo de los residuos orgánicos.

A través de esta investigación, se busca generar conocimiento científico sobre las propiedades del frass producido por *Hermetia illucens* a partir de distintos sustratos, con el fin de valorar su utilidad como una alternativa de compostaje. Esta información aportará a la creación de estrategias más sostenibles para el manejo de residuos orgánicos.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Comparar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los residuos obtenidos de la biooxidación de tres formulaciones de residuos orgánicos, mediante el uso de larvas de mosca soldado negra (*H. illucens*) como alternativa de compostaje y su potencial uso en la agricultura.

4.2. Objetivos específicos

- a) Evaluar la eficiencia de reducción por larvas de mosca soldado negra (*H. illucens*) en tres formulaciones de residuos: aserrín, frutas, verduras y estiércoles ajustados a una relación inicial C/N de 30.
- b) Evaluar la calidad de los productos obtenidos en la biooxidación por las larvas a través de la comparación de las propiedades fisicoquímicas con los indicadores establecidos en la norma NMX-AA-180-SCFI-2018.
- c) Analizar la composición final de macro y micronutrientes de las formulaciones para determinar su potencial agrícola.
- d) Estimar la fase final de la biooxidación asociando los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del frass obtenido mediante *H. illucens*.

5. Hipótesis

Las distintas formulaciones de los residuos degradados por LMSN influyen en la eficiencia de reducción de los residuos orgánicos, la calidad del producto final y fase de biooxidación, así como el contenido microbiológico y de nutrientes.

6. Materiales y métodos

6.1 Sitio del experimento

La evaluación de la eficiencia de reducción y la evaluación fisicoquímica de las formulaciones se llevó a cabo en el Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo en el laboratorio de Química Ambiental.

6.2 Obtención de larvas de mosca soldado negra

Las larvas de mosca soldado negra fueron proporcionadas de una planta piloto establecida en el laboratorio de bioingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), campus Amazcala.

Se obtuvieron larvas de 7 días de edad (Fig. 6). Estas fueron alimentadas previamente con una dieta estándar, llamada "Gainesville" que consiste en 50% de salvado de trigo, 30% de harina de alfalfa y 20% de harina de maíz (Setti *et al.* 2019).



Figura 6. Obtención de larvas. **a)** Criadero de MSN en la UAQ campus Amazcala, UAQ; **b)** LMSN de 7 días alimentadas con dieta Gainesville.

6.3 Formulación de sustratos

Como se muestra en la Tabla 2, se elaboraron tres formulaciones a partir de residuos como aserrín, frutas y verduras variando estiércol de borrego y gallina. Se ajustaron a una relación C/N de 30, ideal para un óptimo proceso de compostaje (Anda-Trasviña *et al.* 2021).

Tabla 2. Porcentaje en peso de los componentes de las formulaciones utilizados para la degradación y alimentación de larvas de mosca soldado negra (*H. illucens*) ajustados a una relación C/N 30.

Componentes (%)	Formulaciones		
	AFV	AFVB	AFVG
Aserrín	20	8	18
Frutas y Verduras	80	44	42
Estiércol de Borrego	-	48	-
Estiércol de Gallina	-	-	40

Los residuos frutas y verduras fueron obtenidos del mercado municipal Benito Juárez del municipio de Tulancingo, Hidalgo, México. El aserrín y los estiércoles fueron recolectados de una carpintería local y una granja de traspatio en Zimapán, Hidalgo, México.

Para alcanzar la relación C/N antes mencionada se utilizó una calculadora (Fig. 7) basada en la ecuación (1) desarrollada por Richard y Trautmann (1996). La relación deseada se obtiene a partir del porcentaje de humedad, carbono, nitrógeno y el peso de los materiales.

Ecuación 1

$$R = \frac{Q_1(C_1 \times (100 - M_1)) + Q_2(C_2 \times (100 - M_2)) + Q_3(C_3 \times (100 - M_3)) + \dots}{Q_1(N_1 \times (100 - M_1)) + Q_2(N_2 \times (100 - M_2)) + Q_3(N_3 \times (100 - M_3)) + \dots}$$

Donde:

R= relación C/N

Q_n= masa del material

C_n= carbón (%)

N_n= nitrógeno (%)

M_n = humedad de la materia (%)

Ingredient	% H ₂ O	Weight	% Carbon	% Nitrogen	C/N Ratio
				Result:	

Figura 7. Calculadora de relación C/N desarrollada por Richard y Trautmann (1996) de la universidad de Cornell, NY.

En recipientes de 6 cm x 14 cm x 18 cm (alto, ancho y largo, respectivamente), se agregaron 500 g en peso fresco de cada formulación. Posteriormente se añadieron 500 larvas (Rehman *et al.* 2017) de 7 días de edad (Fig. 8). Las larvas fueron alimentadas dos veces por semana con 150 g de sustrato formulado, hasta finalizar su etapa larvaria, alcanzando una alimentación total de 1,050 g.

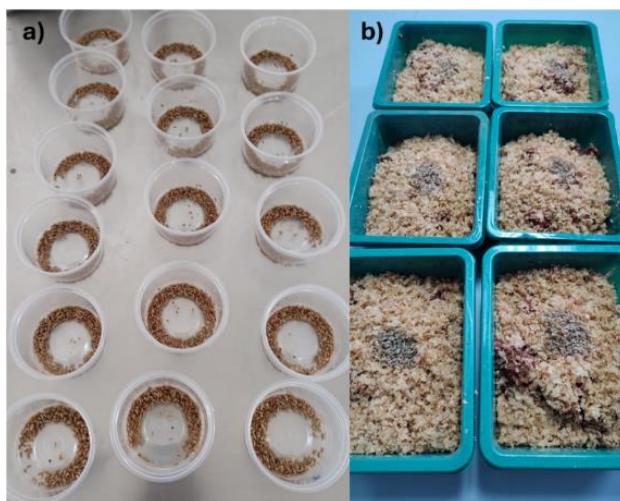


Figura 8. Adición de larvas de *H. illucens*. **a)** Conteo de 500 larvas para cada tratamiento formulado; **b)** Sustratos formulados con la adición de las LMSN.

Las condiciones experimentales se realizaron mediante una cámara de humedad a una temperatura de 27 °C y humedad relativa constante de 67% (Beesigamukama *et al.* 2021). Al finalizar la etapa larvaria (31 días) se separaron las larvas del sustrato mediante un tamiz de 5 y 10 mesh. Después, se pesaron 50 larvas para cada tratamiento con tres repeticiones. Los residuos obtenidos (Fig. 9) se secaron en condiciones ambientales por 5 días (Velasco-Velasco *et al.* 2021), para análisis posteriores.

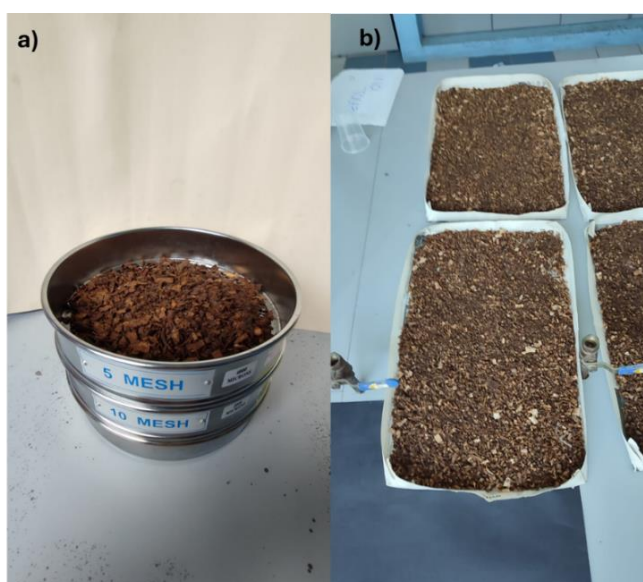


Figura 9.Proceso de separación y secado de los sustratos **a)** Separación de larvas de los sustratos mediante un tamiz de 2mm; **b)** secado de los tratamientos a temperatura ambiente.

6.4 Cálculo de la eficiencia de reducción de los residuos

Se define como eficiencia de reducción (ER) a la cantidad de sustrato consumido en la etapa larvaria de la MSN. Esta se determina con la siguiente ecuación (2) (Diener *et al.* 2009):

Ecuación 2

$$\%ER = \frac{(P_i - P_f)}{P_i} \times 100$$

Donde:

%ER: Eficiencia de reducción expresada en porcentaje

P_i: peso inicial del sustrato

P_f: peso final del sustrato

6.5 Análisis de los parámetros fisicoquímicos del frass

6.5.1 Parámetros químicos

pH y Conductividad eléctrica (CE)

Para la medición de pH y conductividad eléctrica (CE), se pesaron 10 g de muestra de cada tratamiento para realizar un extracto acuoso con agua destilada en proporción 1:10 (p/v). Posteriormente, con un equipo multiparámetro, calibrado modelo Orión-versa star Thermo Scientific™, se registraron los datos (Beesigamukama *et al.* 2021).

Potencial Redox (Eh)

Para la determinación del Eh, se utilizó el equipo Oakton 510 previamente calibrado. Posteriormente se midió el voltaje de un extracto acuoso con agua destilada en una proporción 1:10 (p/v) por cada tratamiento (Fig. 10) (Husson, 2013).



Figura 10. Medición de voltaje de los tratamientos para la evaluación del Eh mediante el equipo Oakton 510.

Materia orgánica (MO)

En la determinación de materia orgánica se implementó el método de calcinación (Eyherabide *et al.* 2014; Velasco-Velasco *et al.* 2021). Para ello, se pesaron 5 g de muestra en crisoles de porcelana previamente secados y tarados. Se colocaron las muestras en la mufla a 550 °C durante 2 h. Después, los crisoles se enfriaron en un desecador y se pesaron a peso constante. Los porcentajes de cenizas y materia orgánica se calcularon mediante la diferencia de peso de los crisoles antes y después de la combustión utilizando la ecuación 3 y 4:

Ecuación 3

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{(PCC - PC)}{\text{muestra (g)}} \times 100$$

Donde:

PCC= Peso del crisol con cenizas

PC= Peso del crisol

100= referido a porcentaje

Ecuación 4

Cálculo de materia orgánica

$$\%MO = 100 - \% Cenizas$$

Donde:

%MO= Materia orgánica expresada en porcentaje

Carbono orgánico total (COT)

El contenido de COT de los tratamientos se calculó a partir del total la MO y el factor de Van Benmelen (1.724) de acuerdo con la norma NMX-FF-109-SCFI-2008 mediante la ecuación 5:

Ecuación 5

$$\% COT = (MO)(1.724)$$

Donde

%COT = Porcentaje de Carbono Orgánico Total

MO = Concentración de Materia Orgánica (%)

Análisis de Macro y micronutrientes

Para el análisis de nitrógeno total (NT) de las muestras, se empleó una digestión ácida utilizando el método Kjeldahl de acuerdo con la metodología descrita por Rodríguez y Rodríguez (2015).

Los macro y micronutrientes fueron evaluados de acuerdo con las especificaciones de la NOM-021-RECNAT-2000: el análisis de fósforo (P) se llevó a cabo mediante la digestión con una mezcla diácida para posteriormente determinarse por fotolorimetría a través de la reducción con molibdovanadato. Para la evaluación de sodio (Na) y potasio (K), se utilizó una digestión con mezcla diácida y posteriormente se determinaron mediante espectrofotometría de emisión de flama. El Calcio, Magnesio, Hierro, Cobre y Zinc (Ca, Mg, Fe, Cu, Zn) fueron analizados por espectrofotometría de absorción atómica mediante una digestión de mezcla diácida (SEMARNAT, 2002).

6.5.2 Parámetros físicos

Temperatura y Humedad

La medición de la temperatura de los sustratos se realizó mediante un termómetro digital, colocado a una profundidad de 5 cm en los sustratos durante todo el periodo de reducción de los residuos (Beesigamukama *et al.* 2021).

Para la evaluación del porcentaje de humedad final en los sustratos se implementó el método gravimétrico (Rodríguez y Rodríguez, 2015), que consiste en una diferencia de pesos entre la masa de la materia orgánica húmeda y la masa de la materia orgánica seca. Se colocaron 10 g de muestra fresca en una estufa de secado a 105 °C durante 24 h, posteriormente se pesa nuevamente la muestra hasta llegar a peso constante; con los datos obtenidos se aplicó la ecuación 6:

Ecuación 6

$$\%H = \frac{(\text{Peso de la muestra en humedo} - \text{Peso de la muestra en seco})100}{\text{Peso de la muestra en seco}}$$

Donde:

%H= contenido de humedad gravimétrica expresado en porcentaje

6.6 Determinación de la actividad microbiológica

Para la determinación de hongos, bacterias, actinomicetos y microorganismos con actividad específica (amilolíticos, amonificantes, nítrico-oxidantes, nitrito-oxidantes y celulíticos) se realizaron una serie de diluciones a partir de 5 g del frass. A esta se le adicionó agua estéril en proporción 1:10 (p/v), posteriormente se agitó durante 10 min dejando reposar por 15 s. Después en condiciones de estériles, se pasó 1 mL del extracto acuoso a un tubo de 9 mL de agua estéril. Seguido de esto se realizaron diluciones seriadas de 10^{-1} a 10^{-9} g/mL por cada tratamiento (Ramírez *et al.* 2021).

Para la cuantificación de hongos, bacterias y actinomicetos, se utilizó un medio de crecimiento gelatinosos selectivo y semi-selectivo (Ramírez *et al.* 2021). Se tomó 1 mL de las diluciones 10^{-6} a 10^{-8} g/mL y se inocularon en los diferentes medios de cultivo. Se realizaron tres repeticiones por dilución de cada tratamiento. Después, se incubaron a 28 °C en diferentes tiempos (Tabla 3). Transcurrido el tiempo de incubación se realizó el conteo de UFC/g.

Tabla 3. Medios de cultivo y días de incubación para el conteo de hongos, bacterias y actinomicetos.

Grupo Microbiano	Medio de cultivo	Días
Hongos	Agar papa dextrosa	3 a 5
Bacterias	Agar nutritivo	5 a 7
Actinomicetos	Agar Czapeck	7 a 10

Asimismo, mediante las diluciones seriadas se evaluó la presencia o ausencia de grupos microbianos con actividad específica amilolíticos, amonificantes, nítrico-oxidantes, nitrito-oxidantes y celulíticos mediante la metodología reportada por Ramírez *et al.* (2021). Con una pipeta estéril se transfirió 1 mL del extracto acuoso de las diluciones 10^{-4} a 10^{-6} g/mL, a tubos con 9 mL de diferentes medios de cultivo líquidos (Tabla 4), previamente esterilizados. Posteriormente se colocaron en una incubadora a 28 °C en

los tiempos especificados en la tabla 4. Se realizaron tres repeticiones por dilución por cada tratamiento (Fig. 11). Transcurrido el tiempo de incubación se adicionaron 2 a 3 gotas de indicador en cada medio de cultivo.

Tabla 4. Medios de cultivo, días de incubación, indicadores y diluciones utilizadas para grupos microbianos con actividades específicas.

Grupo Microbiano	Medio de cultivo	Días	Indicador	Viraje
Amilolíticos	Almidón	15	Lugol	Naranja
Amonificantes	Peptona de gelatina	15	Nessler	Amarillo
Nítrico - oxidantes	NH_4^+ + sales minerales	15	Difenilamina	Azul
Nitrito – oxidantes	NO_2^- + sales minerales	20	Difenilamina	Azul
Celulíticos	Carboximetil celulosa	15	Rojo Congo	Rojo

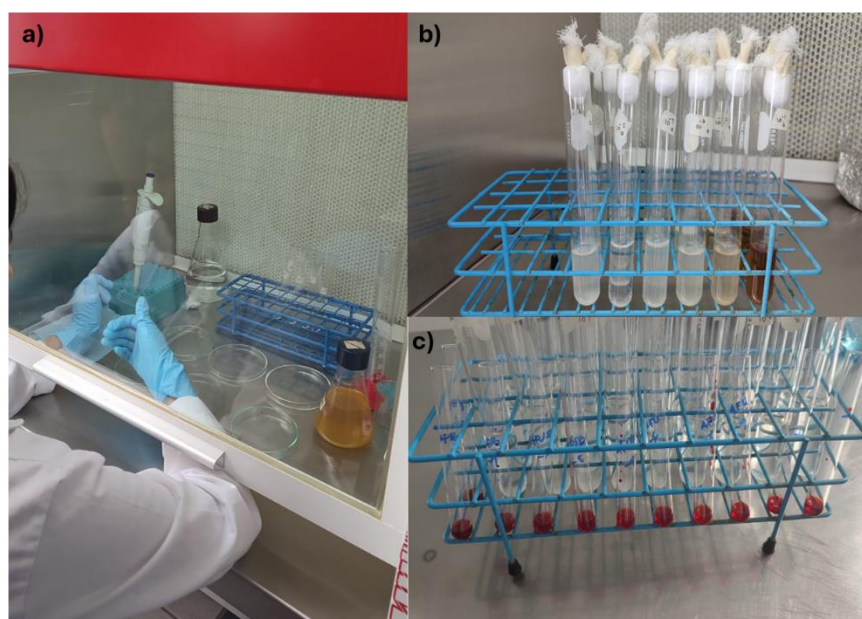


Figura 11. Determinación de microorganismos **a)** preparación de medios de cultivo para hongos, bacterias y actinomicetos; **b)** diluciones seriadas para la identificación de microorganismos; **c)** tinción de medio para la evaluación de actividad celulolítica.

6.7 Diseño experimental

Se implementó un diseño completamente al azar, los datos se procesaron mediante un análisis de varianza ANOVA, se utilizó la prueba de Tukey para comparar medias ($p \leq 0.05$). Se utilizó el paquete estadístico Minitab versión 18.

7. Resultados

7.1 Reducción de los residuos y peso de las larvas

Bajo las condiciones experimentales de este estudio, el tiempo de desarrollo de las larvas fueron de 31 días en las tres formulaciones, durante este tiempo, la reducción de los residuos en peso fresco fue mayor al 65%. En la Figura 12 se aprecia una ER mayor en el tratamiento AFV respecto a los tratamientos AFVB y AFVG.

En la Figura 13 se muestran los pesos promedio de las larvas para los tres tratamientos. Iniciando con un peso de 0.33 g para 50 larvas. La formulación AFVG presentó un peso mayor al tratamiento AFV y AFV.

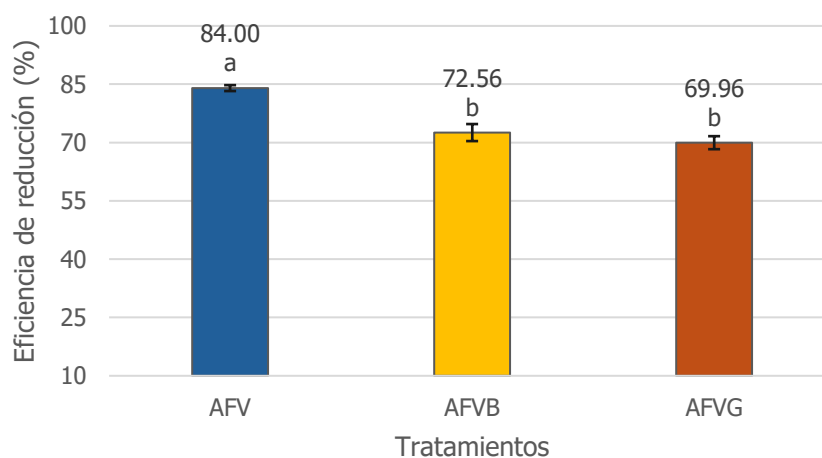


Figura 12. Porcentaje de eficiencia de reducción de los tratamientos en peso fresco. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) (prueba de Tukey) entre los tratamientos, los valores representan el promedio de tres observaciones.

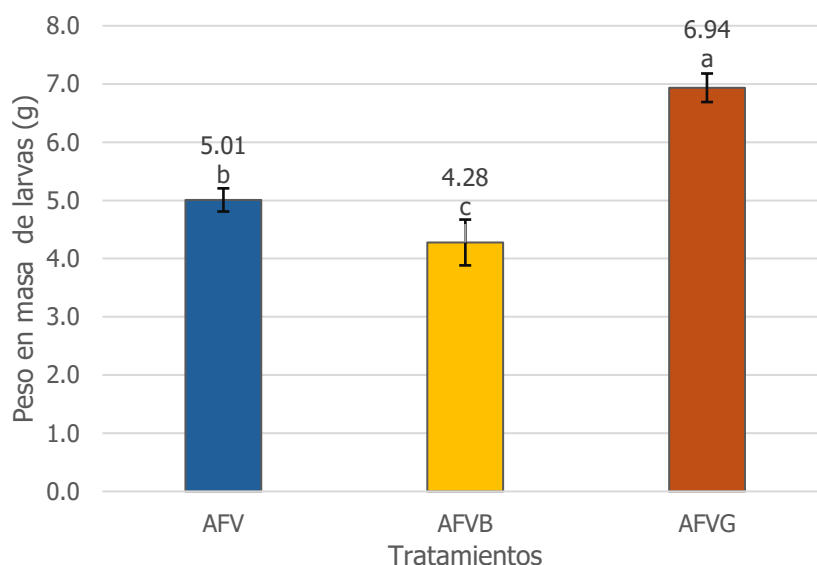


Figura 13. Peso promedio de 50 larvas en gramos en los distintos tratamientos. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) (prueba de Tukey) entre los tratamientos, los valores representan el promedio de tres observaciones.

7.2 Parámetros de acuerdo con la Norma Mexicana

Para evaluar la calidad de los residuos generados, se compararon sus parámetros fisicoquímicos con las especificaciones de la norma NMX-AA-180-SCFI-2018.

Los valores de temperatura y humedad de los tratamientos estuvieron dentro de los parámetros establecidos por la norma, excepto el contenido de humedad en el tratamiento AFVG (Tabla 5), probablemente al tipo de residuo utilizado.

Tabla 5. Parámetros físicos finales de los residuos degradados por las larvas de mosca soldado negra, temperatura y humedad con valores de referencia de la norma NMX-AA-180-SCFI-2018*

Parámetro	Tratamiento			Valor de referencia*
	AFV	AFVB	AFVG	
Temperatura (°C)	27.13 ±1.361 ^b	27.55 ±0.934 ^{ab}	28.71 ±1.861 ^a	25-50
Humedad (%)	34.96 ±0.99 ^b	35.71 ±0.53 ^b	42.54 ±0.66 ^a	20-40

Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) (prueba de Tukey) entre los tratamientos, los valores representan el promedio de tres observaciones.

En la tabla 6 se presentan los parámetros químicos medidos, el pH de las formulaciones presentó valores alcalinos superando los valores de la norma, siendo AFVG el que presentó el valor más bajo. Respecto a la CE, el tratamiento AFVB superó el límite establecido en la norma, mientras que en AFV y AFVG no existieron diferencias significativas entre sí.

Respecto al contenido de MO y la relación C/N en los tratamientos superaron los valores de la norma, a diferencia del contenido de COT, que si se ajustó a los estándares. El tratamiento AFV presentó valores más altos en los tres parámetros, seguido por AFVG y AFVB. Los resultados mostraron una correlación directa: a mayor contenido de MO, mayor COT y una relación C/N más elevada.

En relación con el porcentaje de nitrógeno total, los tratamientos cumplen con los valores establecidos en la norma con un valor superior al 1%.

Tabla 6. Comparación de los parámetros químicos de los tratamientos con los valores de referencia para lombricomposta en la norma NMX-AA-180-SCFI-2018*

Parámetros	Tratamientos			Valor de referencia *
	AFV	AFVB	AFVG	
pH	10.78 ± 0.031 ^a	10.70 ± 0.067 ^a	10.16 ± 0.015 ^b	5.5 a 8.53
CE (dS/m)	2.69 ± 0.267 ^b	4.68 ± 0.455 ^a	2.88 ± 0.255 ^b	≤ 4
MO (%)	92.79 ± 1.244 ^a	77.69 ± 1.80 ^b	83.53 ± 1.11 ^b	20 - 50
COT (%)	52.42 ± 0.703 ^a	43.89 ± 2.71 ^b	47.19 ± 5.18 ^b	Mínimo 10**
C/N	29.15 ± 1.724 ^a	22.02 ± 1.005 ^b	27.31 ± 0.739 ^a	10 - 20
NT (%)	1.79 ± 0.128 ^b	2.01 ± 0.021 ^a	1.72 ± 0.060 ^b	1 - 4

Parámetros evaluados en peso seco; Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) (prueba de Tukey) entre los tratamientos, los valores representan el promedio de tres observaciones; ** valor establecido para composta.

7.3 Cinética de pH y C.E en el proceso de biooxidación

Durante el proceso de biooxidación por las LMSN, tuvieron un aumento súbito de pH en el día cuatro y se mantuvo en 10 hasta finalizar la etapa larvaria. El tratamiento AFVG presentó un pH más bajo que el resto de las formulaciones (Fig. 14).

Respecto a la cinética de la CE, presentó variaciones entre las formulaciones. Durante los días 7, 14 y 29 se observaron picos que se relacionan con el aumento en la concentración de sales en el sustrato. Al final del periodo de observación, los valores disminuyeron con diferencias significativas entre los tratamientos, la formulación AFVB tuvo mayor CE final (Fig. 15).

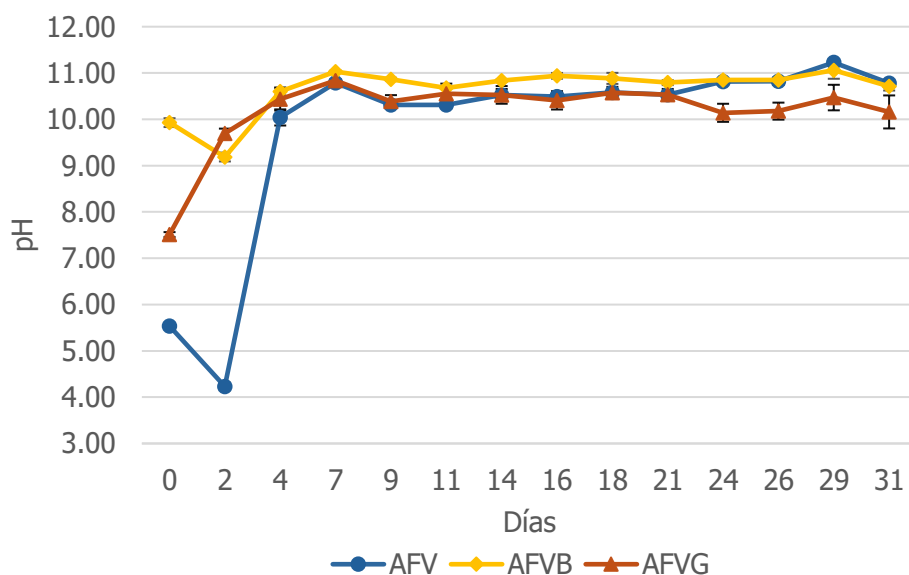


Figura 14. Cinética de pH durante la fase larvaria.

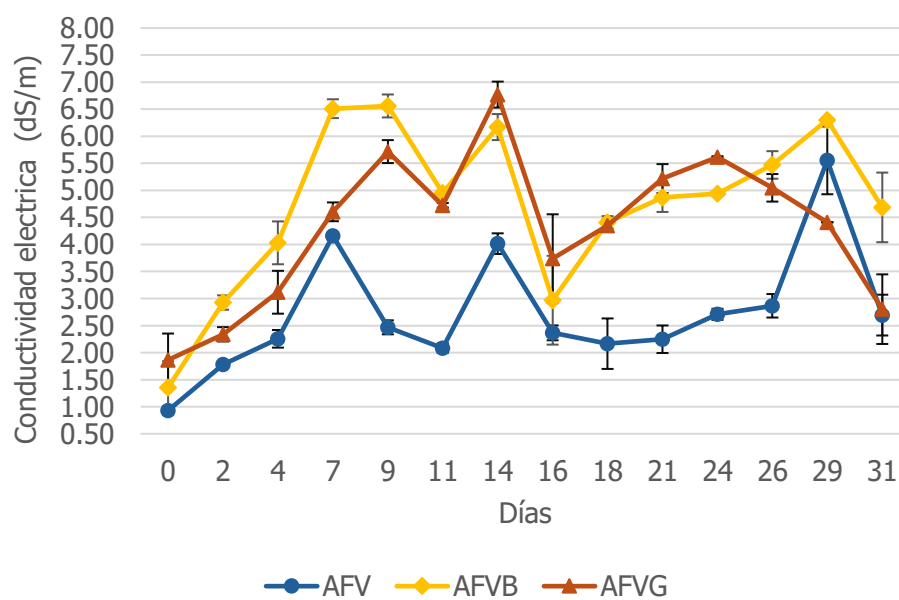


Figura 15. Cinética de C.E durante la fase larvaria.

7.4 Potencial Redox (Eh)

En este estudio se relacionó el potencial redox (Eh) y el pH de los tratamientos para determinar las posibles especies de nitrógeno. De acuerdo con Husson (2013), si el voltaje se encuentra en un rango de 0.2 a -0.2 V y el pH es superior a 9.5, la solución se encuentra en estado alcalino reducido, y la especie de nitrógeno presente es NH_3 . Por lo tanto, según el voltaje obtenido (Fig. 16) y los valores de pH de las formulaciones (>10), se puede sugerir que en los tratamientos evaluados existe la posible presencia de NH_3 .

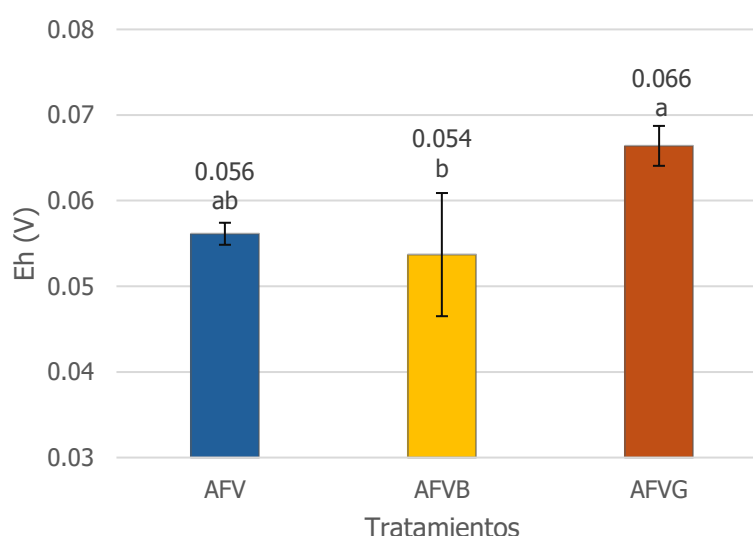


Figura 16. Potencial Redox Eh(V) en los tratamientos evaluados. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) (prueba de Tukey) entre los tratamientos, los valores representan el promedio de tres observaciones.

7.5 Análisis de macro y micronutrientes de los sustratos

De acuerdo con el análisis de macronutrientes de los residuos, presentado en la tabla 7, la formulación AFVB tuvo mayor porcentaje de nitrógeno, mientras que AFVG destacó por presentar mayor porcentaje P, Ca y Mg. El tratamiento AFV presentó los porcentajes más bajos de macronutrientes. El porcentaje de K fue similar entre los tratamientos y fue el elemento con mayor concentración.

Tabla 7. Porcentaje de macronutrientes en los sustratos tratados con LMSN.

Parámetro	Tratamientos		
	AFV	AFVB	AFVG
NT (%)	1.798 ± 0.128 ^b	2.017 ± 0.021 ^a	1.724 ± 0.060 ^b
P (%)	0.203 ± 0.025 ^c	0.460 ± 0.020 ^b	0.950 ± 0.050 ^a
K (%)	3.843 ± 0.092 ^a	3.930 ± 0.091 ^a	3.940 ± 0.151 ^a
Ca (%)	0.440 ± 0.010 ^c	1.950 ± 0.010 ^b	3.617 ± 0.196 ^a
Mg (%)	0.353 ± 0.015 ^c	0.643 ± 0.005 ^b	0.770 ± 0.017 ^a

Parámetros evaluados en peso seco. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) (prueba de Tukey) entre los tratamientos, los valores representan el promedio de tres observaciones.

Por otro lado, en el contenido de micronutrientes (Tabla 8), la formulación AFVG mostró mayor contenido de Fe, Cu, Zn. En cuanto al contenido de Na en los tratamientos existieron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), siendo el tratamiento AFVB con el menor contenido.

Tabla 8. Concentración de micronutrientes en los tratamientos con LMSN.

Parámetro	Tratamientos		
	AFV	AFVB	AFVG
Na (%)	0.76 ± 0.011 ^a	0.32 ± 0.005 ^c	0.64 ± 0.026 ^b
Fe (mg/kg)	381.8 ± 24.7 ^c	782.3 ± 32.1 ^b	1259.4 ± 85.0 ^a
Cu (mg/kg)	22.00 ± 0.433 ^b	19.83 ± 1.880 ^b	229.17 ± 11 ^a
Zn (mg/kg)	67.25 ± 3.030 ^b	85.50 ± 1.00 ^b	286.75 ± 11.83 ^a

Parámetros evaluados en peso seco. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) (prueba de Tukey) entre los tratamientos, los valores representan el promedio de tres observaciones.

7.6 Análisis microbiológico

En la Tabla 9 se observan las UFC encontradas en los tratamientos evaluados, siendo la formulación AFVG con mayor cantidad de bacterias respecto a las demás formulaciones, lo que puede favorecer el proceso de degradación de los residuos. Asimismo, se encontró con la presencia de actinomicetos, sin diferencias significativas entre las formulaciones ($p < 0.05$). En ninguno de los tratamientos se detectó la presencia de hongos.

Tabla 9. Unidades Formadoras de Colonias de hongos, bacterias y actinomicetos en los tratamientos al final de la etapa larvaria.

Grupo microbiano	Tratamientos		
	AFV	AFVB	AFVG
Hongos	*	*	*
Bacterias (UFC $\times 10^9 \text{ g}^{-1}$)	10.66 ± 2.52^b	0.33 ± 0.57^c	21.66 ± 2.08^a
Actinomicetos (UFC $\times 10^8 \text{ g}^{-1}$)	16.67 ± 3.51^a	22.00 ± 3.46^a	18.00 ± 3.00^a

UFC (Unidades Formadoras de Colonias) cuantificadas en placas de agar; *, ausencia de microorganismos; Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) (prueba de Tukey) entre los tratamientos, los valores representan el promedio de tres observaciones.

La identificación de microorganismos con actividad específica en los tratamientos se presenta en la Tabla 10. Se detectaron microorganismos amilolíticos en los tratamientos AFV y AFVG. En cuanto a los microorganismos nítrico oxidantes y amonificantes, se registró su presencia en todos los tratamientos, lo que puede estar relacionado a la nitrificación y amonificación en la mineralización del nitrógeno. No se observó la presencia de microorganismos celulolíticos, ni de nitrito-oxidantes en los tratamientos.

Tabla 10. Determinación cualitativa de grupos microbianos en los tratamientos al final de la etapa larvaria.

Grupo microbiano	Días	Tratamientos		
		AFV	AFVB	AFVG
Amilolíticos	15	-	+	+
Amonificantes	15	+	+	+
Nítrico - oxidantes	15	+	+	+
Nitrito - oxidantes	20	-	-	-
Celulolíticos	15	-	-	-

Nota: +, presencia; -, ausencia

8. Discusión de resultados

En este estudio se evaluó la eficiencia de reducción de residuos orgánicos en tres formulaciones, se determinó su calidad de acuerdo con valores establecidos en la norma NMX-AA-180-SCFI-2018, también se analizó el contenido de macro y micronutrientes de las formulaciones y finalmente mediante parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los residuos generados por las LMSN estimó la fase de biooxidación.

8.1 Eficiencia de reducción de los residuos por *H. illucens* y peso de las larvas

Respecto a la eficiencia de reducción de los sustratos, los resultados de este estudio mostraron valores mayores al 65%, valores similares a los reportado por Gold *et al.* (2018) donde la ER en peso fresco de estiércoles de animales es de 63%, mientras que en residuos vegetales de un 74%.

Para el tiempo de desarrollo de las larvas en estiércoles, El-Dakar *et al.* (2021) reportaron una duración de 26 días en estiércoles de cabra y de gallina, 36 días para estiércol de cerdo y 30 días para estiércol de codorniz tiempo similar a los del presente estudio (31 días).

La similitud en el tiempo de desarrollo larvario podría relacionarse con la materia prima orgánica utilizada fue similar en los tratamientos evaluados. Se ha reportado que el tiempo de reducción depende de la cantidad de larvas, el tipo de residuo y la cantidad del sustrato (Schmitt y de Vries, 2020; Chiam *et al.* 2021).

Attigbe *et al.* (2019) evaluaron residuos alimenticios, gallinaza y aserrín en una relación 3:2:1, utilizando 100 larvas por 1 kg de residuos. Bajo esta formulación las larvas se desarrollaron en un periodo de 8 a 12 días, siendo este tiempo de menor al obtenido en este estudio. Esta variación del tiempo puede estar relacionada al tipo y cantidad de sustrato dado que las larvas tienen mayor afinidad por los residuos alimenticios, mostrando una mayor eficiencia de reducción por las LMSN (Barragán-Fonseca., 2018; Gold *et al.* 2018).

Respecto al peso de las LMSN en este estudio, en la formulación de AFVG tuvieron una mayor ganancia de peso (0.138 g/larva) respecto a los otros tratamientos. Beesigamukama *et al.* (2021) reportaron un peso promedio de 0.115 g/larva, en residuos de cervecería-aserrín en una relación C/N 30 mientras que el peso promedio por larva en relación C/N 15 y el control (sin aserrín) fueron similares (0.130 g/larva) a al tratamiento AFVG.

8.2 Calidad de las formulaciones degradadas por *H. illucens*

La calidad de los productos derivados de la degradación de las formulaciones por efecto de las LMSN, se determinó mediante la norma NMX-AA-180-SCFI-2018 que define los parámetros de calidad del producto final de una lombricomposta (SE, 2007).

Conforme a los criterios establecidos por la norma, el producto de la formulación AFV cumple con 5 de 8 parámetros y los productos de las formulaciones AFVB y AFVG cumplen con 4, por lo que las formulaciones no pueden considerarse como compostas de calidad. Esto puede atribuirse a que la degradación por las LMSN es un proceso rápido y duración corta (Kawasaki *et al.* 2020; Song *et al.* 2021) que impide que alcancen la estabilidad y madurez. Esto sugiere la relevancia de establecer criterios para

la calidad de los residuos degradados mediante las LMSN, ya que el proceso y los organismos utilizados son distintos a los de un proceso de vermicompostaje.

Una consideración clave en la aplicación de compostas en el suelo es su madurez y estabilidad. Para los residuos obtenidos puede ser necesario un postratamiento para evitar efectos negativos en el suelo y los cultivos (Lopes *et al.* 2022).

8.3 Contenido de macro y micronutrientes de las formulaciones degradadas por *H. illucens*

Respecto al contenido de nutrientes, se ha reportado un rango de nitrógeno del 1.81 al 1.86% en estiércoles de gallina, cerdo y vaca tratados mediante LMSN (Liu *et al.* 2019) resultados que son similares a los obtenidos en los tratamientos AFVB y AFVG de este estudio. Así mismo, en residuos alimenticios mezclados con aserrín, se reportó un 1.77% de N (Liu *et al.* 2021) valor comparable con el porcentaje de N en el tratamiento AFV.

En relación con el contenido de fósforo, los valores reportados en la literatura rebasan los reportados en este estudio ya que Liu *et al.* (2019, 2021) indican contenidos de 0.75% para residuos domésticos y 0.96 a 2.69% para estiércoles. Esta diferencia entre los estudios podría deberse a la combinación de los residuos.

Otras investigaciones en las cuales utilizaron LMSN reportan en residuos domésticos y en estiércoles se reportan rangos de 0.05 a 2.15% de K (Liu *et al.* 2019; Kawasaki *et al.* 2020), mientras que los tratamientos en este estudio superan el 3%.

Los resultados de esta investigación muestran valores de micronutrientes superiores a los reportados por otros autores. Por ejemplo, Chiam *et al.* (2021) señalan contenidos 3.69 mg/kg de Fe, 0.86 mg/kg de Cu y 1.73 mg/kg en Zn en residuos de Okara (pulpa de soja) que han sido tratados con LMSN.

Respecto al contenido de sodio de los tratamientos se reportan resultados similares: 0.3% en la dieta Gainesville, 0.08% en residuos de cocina. Por otro lado, Gärttling y

Schulz (2021) reportaron un promedio de 1.07% de sodio para frass de productores en Europa.

El tratamiento AFVG presentó un mayor contenido de macro y micronutrientes, resultados similares a los obtenidos en procesos como el vermicompostaje. El-Sayed (2024) reportó valores de 1.8% de N, 1.02% de P y 1.3% de K en una vermicomposta, mientras que Čabilovski *et al.* (2023) indicaron 1.9% de N, 1.32% de P y 1.05% de K. Estos hallazgos sugieren que el uso de organismos como las LMSN permite obtener niveles de nutrientes (N, P, K) comparables a los alcanzados con otros organismos, como las lombrices.

La composición de macro y micronutrientes del frass, están influenciados por el origen de las materias primas, tipo de sustrato alimenticio y mezcla de residuos iniciales (Elissen *et al.* 2023; Lomonaco *et al.* 2024).

8.4 Estimación de la fase de biooxidación de acuerdo con parámetros físicos, químicos y microbiológicos

Para determinar la estimación del proceso de biooxidación mediante las LMSN se relacionaron diferentes parámetros como la temperatura, la relación C/N, materia orgánica, COT, pH, C.E, Eh, así como la presencia de microorganismos.

La temperatura a lo largo del proceso de biooxidación de residuos mediante LMSN, se mantuvo entre 27 a 28 °C, temperatura promedio óptima para el desarrollo de estos organismos (Caruso *et al.* 2014; Beesigamukama *et al.* 2021).

Respecto a la relación C/N, MO y COT se aprecia una disminución de estos parámetros; sin embargo, esta no fue suficiente para la estabilización y madurez de los residuos. El comportamiento registrado (relación C/N, MO y COT) podría atribuirse a la limitada mineralización del carbono debido al uso de materiales como el aserrín, que, por su alto contenido de lignina, presenta un elevado contenido de carbono (Frioni, 2005; Kawasaki *et al.* 2020; Beesigamukama *et al.* 2021). Azim *et al.* (2018) mencionan que durante el proceso de degradación el porcentaje de COT tiende a disminuir durante el proceso de degradación de los residuos.

Durante la degradación de las formulaciones evaluadas el pH se mantuvo en valores superiores a 10. Lopes *et al.* (2021) reportan un pH final de 8.6 en residuos vegetales, mientras que Liu *et al.* (2019) indican rangos de pH entre 8.17 a 8.40 en frass de diferentes estiércoles. Meneguz *et al.* (2018) mencionan que las larvas pueden modificar el pH del sustrato hasta 9, esta alcalinización estimula la actividad enzimática de la proteasa en el intestino de la larva, favoreciendo una mayor disponibilidad de proteína para su desarrollo.

Al finalizar el proceso de biooxidación por las LMSN los tratamientos presentaron una CE <5 dS/m. Se han reportado diferentes rangos de CE de diferentes frass 2.54 y 2.45 dS/m de estiércol de cerdo y vaca, respectivamente, resultados similares a los de este estudio y 5.49 dS/m para gallinaza y 9.67 dS/m en residuos domésticos, superiores a los tratamientos evaluados en este trabajo (Liu et al. 2019; Kawasaki et al. 2020).

En el análisis microbiológico de los tratamientos evaluados se caracterizaron por la ausencia de UFC de hongos y presencia abundante de actinomicetos y bacterias. La ausencia de hongos puede estar asociada con la alcalinidad de los residuos generados por las LMSN (Lopes *et al.* 2022; Elissen *et al.* 2023), ya que estos microorganismos se desarrollan adecuadamente en un rango de pH de 5 a 8 (Velasco-Velasco *et al.* 2021).

La presencia bacterias puede relacionarse a que, durante el proceso de degradación de la materia orgánica, estos microorganismos son los más predominantes, lo que puede explicar también su presencia en las formulaciones evaluadas. Por otro lado, la presencia de actinomicetos puede estar relacionada a que estos organismos prosperan en ambientes alcalinos (Moreno-Casco y Moral-Herrero, 2007; Velasco-Velasco *et al.* 2021).

En cuanto a la actividad específica de microorganismos, se observó la presencia de grupos con actividad amonificante y nítrico oxidante, que junto con el potencial redox sugiere la presencia de NH_3 , indicando un posible proceso de mineralización del nitrógeno orgánico en las formulaciones destacando la amonificación y nitrificación (Husson, 2013; Frioni, 2005).

Este proceso de mineralización del nitrógeno es probablemente llevado a cabo por bacterias nitrificantes, como las *Nitrosomonas* y bacterias amonificantes, como *Bacillus cereus* y *Serratia sp.* favorecido por medios alcalinos ($\text{pH} > 9$) (Frioni, 2005). Existen actinomicetos del género *Streptomyces* y *Nocardia* los cuales participan en procesos de amonificación de compuestos nitrogenados (Velasco-Velasco *et al.* 2021).

Se ha demostrado que las LMSN disminuyen de manera significativa las comunidades bacterianas y fúngicas en la gallinaza (Zhang *et al.* 2021). Sin embargo, el comportamiento microbiano está influenciado por la fuente de alimentación proporcionada a las larvas (Zhang *et al.* 2021) y de su microbiota intestinal (Ao *et al.* 2021). De manera similar, Quintero (2014) reporta que otros organismos como las lombrices también disminuyen las poblaciones de algunos grupos microbianos como hongos, bacterias y actinomicetos.

Debido a la diversidad microbiana presente en el frass, es necesario realizar más estudios para determinar la posible presencia de bacterias fitopatógenas y prevenir riesgos sanitarios (Kawasaki *et al.* 2020)

Teniendo en cuenta los parámetros evaluados como la temperatura, las propiedades químicas, la presencia de bacterias, la actividad microbiana y el Eh en los sustratos, se estima que el proceso de biooxidación mediante las LMSN ocurre en una fase mesófila.

9. Conclusiones

Las LMSN mostraron una eficiencia de reducción mayor al 65% de las formulaciones valuadas en 31 días, tiempo menor con respecto a una composta común y la vermicomposta.

El frass derivado de las formulaciones degradadas por las LMSN cumplen parcialmente los parámetros definidos en la NMX-AA-180-SCFI-2018, como COT, nitrógeno total y la temperatura. Por tanto, se consideran como compostas inmaduras, debido a que la bioconversión es un proceso rápido y de corta duración, lo que limita su madurez.

De acuerdo con el análisis de macro y micronutrientes, la formulación AFVG presenta una concentración más alta de la mayoría de los nutrientes, similar a la de una vermicomposta. Esta formulación tiene buena eficiencia de reducción y un mayor rendimiento en el peso de las larvas. Sin embargo, se recomienda un post tratamiento para garantizar su maduración y estabilización, con el fin de asegurar su calidad y posible uso en la agricultura.

Los parámetros químicos, físicos y microbiológicos indicaron que el proceso de biooxidación mediante LMSN presenta características propias de una fase mesófila, similar a la primera fase del compostaje tradicional. Esta fase presentó actividad relacionada al ciclo del nitrógeno, particularmente en los procesos de amonificación y nitrificación

Es necesario continuar con estudios para estandarizar el proceso de degradación de los residuos mediante las LMSN para obtener subproductos de calidad que beneficien a la sociedad y el medio ambiente.

10. Bibliografía

- Aira, M., Monroy, F., y Domínguez, J. (2009). Changes in bacterial numbers and microbial activity of pig slurry during gut transit of epigeic and anecic earthworms. *Journal of hazardous materials*, 162(2-3), 1404–1407. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.031>
- Anda-Trasviña, A., García-Galindo, E., Peña-Castañón A., Seminario-Peña, J., y Nieto-Garibay, A. (2021). Residuos orgánicos ¿Basura o Recurso?. 7(3), 19-42. https://www.cibnor.gob.mx/revista-rns/pdfs/vol1num3EE/3_RESIDUOS.pdf
- Ao, Y., Yang, C., Wang, S., Hu, Q., Yi, L., Zhang, J., Yu, Z., Cai, M., y Yu, C. (2021). Characteristics and nutrient function of intestinal bacterial communities in black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae in livestock manure conversion. *Microbial Biotechnology*, 14(3), 886–896. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13595>

- Attigboe, F. K., Ayim, N. Y. K., y Martey, J. (2019). Effectiveness of black soldier fly larvae in composting mercury contaminated organic waste. *Scientific African*, 6(e00205). <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00205>
- Azim, K., Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C., Roussos, S., y Thami Alami, I. (2018). Composting parameters and compost quality: a literature review. *Organic Agriculture*, 8(2), 141–158. <https://doi.org/10.1007/s13165-017-0180-z>
- Barragán-Fonseca, K. B. (2018). Flies are what they eat: Tailoring nutrition of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.) for larval biomass production and fitness: Tailoring nutrition of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.) for larval biomass production and fitness. Wageningen University and Research. <https://doi.org/10.18174/449739>
- Basri, N. E. A., Azman, N. A., Ahmad, I. K., Suja, F., Jalil, N. A. A., y Amrul, N. F. (2022). Potential Applications of Frass Derived from Black Soldier Fly Larvae Treatment of Food Waste: A Review. *Foods*, 11(17), 2664. <https://doi.org/10.3390/foods11172664>
- Beesigamukama, D., Mochoge, B., Korir, N. K., K M Fiaboe, K., Nakimbugwe, D., Khamis, F. M., Subramanian, S., Wangu, M. M., Dubois, T., Ekesi, S., y Tanga, C. M. (2021). Low-cost technology for recycling agro-industrial waste into nutrient-rich organic fertilizer using black soldier fly. *Waste Management*, 119, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.043>
- Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., y Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
- Blahovec, J., Kostecka, Z., y Kocisova, A. (2006). Peptidolytic enzymes in different larval stadium of housefly *Musca domestica*. *Veterinarni Medicina*, 51(4), 139–144. <https://doi.org/10.17221/5533-vetmed>
- Boccazzi, V. I., Ottoboni, M., Martin, E., Comandatore, F., Vallone, L., Spranghers, T., Eeckhout, M., Mereghetti, V., Pinotti, L., y Epis, S. (2017). A survey of the

mycobiota associated with larvae of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) reared for feed production. *PloS One*, 12(8), e0182533.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182533>

Čabilovski, R., Manojlović, M. S., Popović, B. M., Radojčin, M. T., Magazin, N., Petković, K., Kovačević, D., y Lakićević, M. D. (2023). Vermicompost and vermicompost leachate application in strawberry production: Impact on yield and fruit quality. *Horticulturae*, 9(3), 337. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030337>

Caruso, D., Devic, E., Subamia, I. W., Talamond, P., y Baras, E. (2014). Technical handbook of domestication and production of Diptera Black Soldier Fly (BSF), *Hermetia illucens*, Stratiomyidae. IPB Press; IRD.
https://www.researchgate.net/publication/264786281_Technical_handbook_of_domestication_and_production_of_diptera_Black_Soldier_Fly_BSF_Hermetia_illucens_Stratiomyidae

CCA. (2017). Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte, informe sintético. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal. 52 pp.

Chiam, Z., Lee, J. T. E., Tan, J. K. N., Song, S., Arora, S., Tong, Y. W., y Tan, H. T. W. (2021). Evaluating the potential of okara-derived black soldier fly larval frass as a soil amendment. *Journal of Environmental Management*, 286, 112163.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112163>

Čičková, H., Newton, G. L., Lacy, R. C., y Kozánek, M. (2015). The use of fly larvae for organic waste treatment. *Waste Management*, 35, 68-80.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.026>

Dávila Medina, M. D., Gallegos Morales, G., Hernández Castillo, F. D., Ochoa Fuente, Y. M., y Flores Olivas, A. (2013). Actinomicetos antagónicos contra hongos fitopatógenos de importancia agrícola. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(8), 1187–1196. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342013000800006

- Diener, S., Zurbrügg, C., Roa-Gutiérrez, F., y Nguyen, H. D. (2011). Black soldier fly larvae for organic waste treatment – prospects and constraints. Ponencia presentada en International Conference on Solid Waste Management in the Developing Countries, Khulna, Bangladesh. [https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/BSF/Black soldier fly larvae for organic waste treatment.pdf](https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/BSF/Black_soldier_fly_larvae_for_organic_waste_treatment.pdf)
- Diener, S., Zurbrügg, C., y Tockner, K. (2009). Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates. Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, 27(6), 603–610. <https://doi.org/10.1177/0734242X09103838>
- Domínguez, J., Aira, M., y Gómez-Brandón, M. (2010). Vermicomposting: Earthworms enhance the work of microbes. Microbes at Work (pp. 93–114). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04043-6_5
- Dortmans, B. M. A., Egger, J., Diener, S., y Zurbrügg, C. (2021). Black Soldier Fly Biowaste Processing: A Step-by-Step Guide (2^a ed.). Eawag – Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Department of Sanitation, Water and Solid Waste for Development (Sandec). [https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/BSF/BSF Biowaste Processing LR.pdf](https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/BSF/BSF_Biowaste_Processing_LR.pdf)
- Drózdź, D., Wystalska, K., Malińska, K., Grosser, A., Grobelak, A., y Kacprzak, M. (2020). Management of poultry manure in Poland – Current state and future perspectives. Journal of Environmental Management, 264, 110327. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110327>
- Dume, B., Hanc, A., Svehla, P., Michal, P., Chane, A. D., y Nigussie, A. (2023). Composting and vermicomposting of sewage sludge at various C/N ratios: Technological feasibility and end-product quality. Ecotoxicology and Environmental Safety, 263, 115255. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115255>

- El- Sayed, S. (2024). Integrated use of vermicompost and biofertilizers to enhance growth, yield and nutrient content of tomato grown under organic conditions. *Egyptian Journal of Veterinary Science*, 51(1), 103–116. <https://doi.org/10.21608/ejoh.2023.224331.1259>
- El-Dakar, M. A., Ramzy, R. R., Plath, M., y Ji, H. (2021). Evaluating the impact of bird manure vs. mammal manure on *Hermetia illucens* larvae. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123570. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123570>
- Elissen, H. J. H., van der Weide, R. y Gollenbeek, L. 2023. Effects of black soldier fly frass on plant and soil characteristics – a literature overview. Wageningen Research, Report WPR- 996. <https://doi.org/10.18174/587213>
- El-mrini, S., Aboutayeb, R. y Zouhri, A. (2022). Effect of initial C/N ratio and turning frequency on quality of final compost of turkey manure and olive pomace. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69(1). <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00092-6>
- Eyherabide, M., Saíenz, R.H., Barbieri, P., y Echeverría, H. E. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del suelo*, 32(1), 13-19. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672014000100002
- Frioni, L. (2005). *Procesos Microbianos* (Fundación Universidad Nacional de Rio Cuarto Argentina, Ed.). Universidad de la República, Uruguay.
- Gärttling, D., y Schulz, H. (2022). Compilation of black soldier fly frass analyses. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(1), 937-943. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00703-w>
- Gold, M., Tomberlin, J. K., Diener, S., Zurbrügg, C., y Mathys, A. (2018). Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review. *Waste Management*, 82, 302-318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.022>

- González, I., Robledo-Mahón, T., Silva-Castro, G. A., Rodríguez-Calvo, A., Gutiérrez, M. C., Martín, M. Á., Chica, A. F., y Calvo, C. (2016). Evolution of the composting process with semi-permeable film technology at industrial scale. *Journal of Cleaner Production*, 115, 245-254. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.033>
- Husson, O. (2013). Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant and Soil*, 362(1-2), 389-417. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7>
- Kawasaki, K., Kawasaki, T., Hirayasu, H., Matsumoto, Y., y Fujitani, Y. (2020). Evaluation of fertilizer value of residues obtained after processing household organic waste with black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*). *Sustainability*, 12(12), 4920. <https://doi.org/10.3390/su12124920>
- Lalander, C., Ermolaev, E., Wiklicky, V., y Vinnerås, B. (2020). Process efficiency and ventilation requirement in black soldier fly larvae composting of substrates with high water content. *The Science of the Total Environment*, 729, 138968. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138968>
- Liu, T., Awasthi, M. K., Chen, H., Duan, Y., Awasthi, S. K., y Zhang, Z. (2019). Performance of black soldier fly larvae (Diptera: Stratiomyidae) for manure composting and production of cleaner compost. *Journal of Environmental Management*, 251, 109593. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109593>
- Liu, T., Awasthi, S. K., Qin, S., Liu, H., Awasthi, M. K., Zhou, Y., Jiao, M., Pandey, A., Varjani, S., y Zhang, Z. (2021). Conversion food waste and sawdust into compost employing black soldier fly larvae (diptera: Stratiomyidae) under the optimized condition. *Chemosphere*, 272, 129931. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129931>
- Lomonaco, G., Franco, A., De Smet, J., Scieuzo, C., Salvia, R., y Falabella, P. (2024). Larval frass of *Hermetia illucens* as organic fertilizer: Composition and beneficial

effects on different crops. *Insects*, 15(4), 293.
<https://doi.org/10.3390/insects15040293>

Lopes, I. G., Yong, J. W. H., y Lalander, C. (2022). Frass derived from black soldier fly larvae treatment of biodegradable wastes. A critical review and future perspectives. *Waste Management*, 142, 65-76. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.007>

Macías Duarte, R., Grijalva Contreras, R. L., Robles Contreras, F., López Carvajal, A., yNúñez Ramírez, F. (2020). Respuesta de la composta sobre la fertilidad, humedad del suelo, contenido nutrimental en hojas y productividad en olivo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(8), 1879–1890.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.2141>

Meneguz, M., Gasco, L., y Tomberlin, J. K. (2018). Impact of pH and feeding system on black soldier fly (*Hermetia illucens*, L; Diptera: Stratiomyidae) larval development. *PloS One*, 13(8), e0202591.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202591>

Moreno-Casco, J., y Moral-Herrero, R. (2007). *Compostaje*. Mundi-Prensa.

Naser El Deen, S., van Rozen, K., Elissen, H., van Wikselaar, P., Fodor, I., van der Weide, R., Hoek-van den Hil, E. F., Rezaei Far, A., y Veldkamp, T. (2023). Bioconversion of different waste streams of animal and vegetal origin and manure by black soldier fly larvae *Hermetia illucens* L. (Diptera: Stratiomyidae). *Insects*, 14(2), 204. <https://doi.org/10.3390/insects14020204>

Nieto Garibay, A., Troyo Diéguez, E., Murillo Amador, B., García Hernández, J. L., y Larrinaga Mayoral, J. A. (2021). La composta. Importancia, elaboración y uso agrícola. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.

Oliveira, F., Doelle, K., List, R., y O'reilly, J. R. (2015). Assessment of Diptera: Stratiomyidae, genus *Hermetia illucens* (L., 1758) using electron microscopy. *Journal of Entomology and Zoology Studies*. 3(5), 147-152.
<https://www.entomoljournal.com/vol3Issue5/pdf/3-5-21.1.pdf>

- Paritosh, K., Yadav, M., Mathur, S., Balan, V., Liao, W., Pareek, N., y Vivekanand, V. (2018). Organic fraction of municipal solid waste: Overview of treatment methodologies to enhance anaerobic biodegradability. *Frontiers in energy research*, 6. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00075>
- Poveda, J. (2021). Insect frass in the development of sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00656-x>
- Quilliam, R. S., Nuku-Adeku, C., Maquart, P., Little, D., Newton, R., y Murray, F. (2020). Integrating insect frass biofertilisers into sustainable peri-urban agro-food systems. *Journal of insects as food and feed*, 6(3), 315-322. <https://doi.org/10.3920/jiff2019.0049>
- Quintero, L. R. (2014). Poblaciones microbianas, actividades enzimáticas y sustancias húmicas en la biotransformación de residuos. *Terra Latinoamericana*, 32(2), 161-172.
- Ramírez Gama, R. M., Tsuzuki Reyes, G., y Urzúa Hernández, M. del C. (2021). Técnicas de cuantificación y aislamiento de los microorganismos del suelo y la rizosfera. En R. Ferrera Cerrato, A. Alarcón, J. Pérez Moreno, J. Delgadillo Martínez, J. Alvarado López, y J. J. Almaraz Suarez (Eds.), *Microbiología aplicada a la agricultura y agrosistemas principios y técnicas para su investigación* (pp. 13-20). COLPOS.
- Rehman, K. U., Cai, M., Xiao, X., Zheng, L., Wang, H., Soomro, A. A., Zhou, Y., Li, W., Yu, Z., y Zhang, J. (2017). Cellulose decomposition and larval biomass production from the co-digestion of dairy manure and chicken manure by mini-livestock (*Hermetia illucens* L.). *Journal of Environmental Management*, 196, 458-465. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.047>
- Rehman, K. U., Ur Rehman, R., Somroo, A. A., Cai, M., Zheng, L., Xiao, X., Ur Rehman, A., Rehman, A., Tomberlin, J. K., Yu, Z., y Zhang, J. (2019). Enhanced bioconversion of dairy and chicken manure by the interaction of exogenous bacteria

- and black soldier fly larvae. *Journal of Environmental Management*, 237, 75–83.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.048>
- Richard, T., y Trautmann, N. (1996). C/N Ratio - CORNELL Composting.
http://compost.css.cornell.edu/calc/cn_ratio.html
- Rodríguez Fuentes, H., y Rodríguez Absi, J. (2015). Métodos de análisis de suelos y plantas. Trillas.
- Román, P., Martínez, M. M., y Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina. Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/3/i3388s/I3388S.pdf>
- Salomone, R., Saija, G., Mondello, G., Giannetto, A., Fasulo, S., y Savastano, D. (2017). Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens*. *Journal of Cleaner Production*, 140, 890–905. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.154>
- Schmitt, E., y de Vries, W. (2020). Potential benefits of using *Hermetia illucens* frass as a soil amendment on food production and for environmental impact reduction. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 25, 100335. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.03.005>
- Secretaría de Economía (SE) (2008). NMX-FF-109-SCFI-2008: Que establece las especificaciones de calidad que debe cumplir el humus de lombriz que se produce o se comercializa en territorio nacional. Se excluye el humus de lombriz en presentación líquida. Ciudad de México. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Economía (SE) (2018). NMX-AA-180-SCFI-2018: Que establece métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales. Ciudad de México. Diario Oficial de la Federación.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2002). NOM-021-RECNAT-2000: Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Ciudad de México. Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (2018). Informe del Medio Ambiente. Gobierno de México. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap7.html>.
- SEMARNAT. (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Lucart Estudio S.A. de C.V. Ciudad de México, México. 274 pp. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
- Setti, L., Francia, E., Pulvirenti, A., Gigliano, S., Zaccardelli, M., Pane, C., Caradonia, F., Bortolini, S., Maistrello, L., y Ronga, D. (2019). Use of black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae processing residue in peat-based growing media. *Waste Management*, 95, 278-288. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.017>
- Singh, A., Marathe, D., y Kumari, K. (2022). Black soldier fly *Hermetia illucens* (L.): Ideal environmental conditions and rearing strategies. *The Indian journal of entomology*, 1–11. <https://doi.org/10.55446/ije.2022.166>
- Song, S., Ee, A. W. L., Tan, J. K. N., Cheong, J. C., Chiam, Z., Arora, S., Lam, W. N., y Tan, H. T. W. (2021). Upcycling food waste using black soldier fly larvae: Effects of further composting on frass quality, fertilising effect and its global warming potential. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125664>.
- Terra, W.R., Espinoza-Fuentes, F.P., Ferreira, C., (1988). Midgut amylase, lysozyme, aminopeptidase, and trehalase from larvae and adults of *Musca domestica*. *Arch. Insect Biochem. Physiol.* 9, 283-297.

- Tomberlin, J. K., Adler, P. H., y Myers, H. M. (2009). Development of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) in relation to temperature. *Environmental Entomology*, 38(3), 930-934. <https://doi.org/10.1603/022.038.0347>
- Velasco Velasco, J., Romero Yam, L. A., Almaraz Suárez, J. J., Ferrera Cerrato, R., Alarcón, A., Julián, D. M., y Cruz García, N. (2021). Técnicas de Compostaje y Vermicompostaje. En R. Ferrera Cerrato, J. Delgadillo Martínez, A. Alarcón, J. Alvarado López, J. Pérez Moreno, y J. José Almaraz Suárez (Eds.), *Microbiología aplicada a la agricultura y sus agrosistemas principios y técnicas para su investigación* (pp. 307-328). COLPOS.
- Villegas-Cornelio, V. M., y Laines Canepa, J. R. (2017). Vermicompostaje: I avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(2), 393–406. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i2.59>
- Xie, S., Tran, H.-T., Pu, M., y Zhang, T. (2023). Transformation characteristics of organic matter and phosphorus in composting processes of agricultural organic waste: Research trends. *Materials Science for Energy Technologies*, 6, 331-342. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.02.006>
- Xu, C., y Mou, B. (2016). Vermicompost affects soil properties and spinach growth, physiology, and nutritional value. *HortScience: a publication of the American Society for Horticultural Science*, 51(7), 847–855. <https://doi.org/10.21273/hortsci.51.7.847>
- Zhang, X., Zhang, J., Jiang, L., Yu, X., Zhu, H., Zhang, J., Feng, Z., Zhang, X., Chen, G., y Zhang, Z. (2021). Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae significantly change the microbial community in chicken manure. *Current Microbiology*, 78(1), 303-315. <https://doi.org/10.1007/s00284-020-02276-w>
- Zhineng, Y., Ying, M., Bingjie, T., Rouxian, Z., y Qiang, Z. (2021). Intestinal microbiota and functional characteristics of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*). *Annals of Microbiology*, 71(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s13213-021-01626-8>