

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

FACULTAD DE CIENCIAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS

ESPECIALIDAD EN GESTIÓN AMBIENTAL

Propuesta de gestión sostenible de residuos orgánicos mediante un sistema de tratamiento acoplado lombriz roja californiana-mosca soldado negra.

Trabajo terminal

Que para obtener el diploma de

ESPECIALIDAD EN GESTIÓN AMBIENTAL

Presenta

Ricardo Gamiz Ramírez

Ensenada Baja California, 5 de mayo del 2025

Índice

Resumen

Introducción

I. Planteamiento del problema

II. Justificación

III. Objetivo general

IV. Objetivos específicos

V. Marco teórico

5.1 Procesos de transformación de residuos orgánicos

5.2 Lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*)

5.3 Mosca soldado negra (*Hermetia illucens*)

5.4 Ensamble de sistemas de biotransformación y casos de éxito para el tratamiento de residuos orgánicos

5.4.1 Estudio de Sebayang et al. (2022): Bio-Vermigot

5.4.2 Estudio de Fadhillah y Bagastyo (2020)

5.4.3 Estudio de Ramnarin et al. (2019)

VI. Marco normativo

6.1 Nivel nacional (México)

6.1.1 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)

6.1.2 Norma Mexicana NMX-FF-109-SCFI-2007

6.2 Nivel estatal para Baja California

6.2.1 Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos para el Estado de Baja California (LPGIRBC)

6.3 Nivel local para el municipio de Ensenada

6.3.1 Reglamento para el Control de la Calidad Ambiental del Municipio de Ensenada, B.C.

VII. Economía circular y sostenibilidad

VIII. Antecedentes

IX. Metodología

9.1 Revisión bibliográfica sistemática

9.2 Diseño experimental mejorado

X. Resultados

10.1 Resultados de la búsqueda bibliográfica

10.2 Resultados del diseño experimental

10.3 Modelo propuesto de bioconversión acoplado: Mosca Soldado Negra y Lombriz Roja Californiana

10.4 Validación práctica y normativa

10.4.1 Protocolo experimental

10.4.2 Cumplimiento NMX-FF-109-SCFI-2007

XI. Discusión

XII. Conclusiones

Literatura citada

Resumen

La gestión ineficiente de residuos orgánicos (RO) en Ensenada, Baja California, representa un desafío ambiental y logístico significativo, agravado por la falta de infraestructura adecuada para su tratamiento. Este trabajo propone un modelo sostenible de revalorización de RO mediante el uso combinado de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) y mosca soldado negra (*Hermetia illucens*), organismos reconocidos por su eficiencia en la biotransformación de desechos orgánicos en productos de alto valor, como fertilizantes y proteínas. A través de una revisión bibliográfica exhaustiva, se analiza la viabilidad de este sistema en las condiciones ambientales de Ensenada, identificando los factores críticos para su implementación. Además, se presenta un protocolo experimental para la estandarización del sistema, con el objetivo de optimizar su eficiencia y adaptabilidad a escala local. Los resultados de este estudio buscan no solo mitigar los impactos ambientales asociados a la mala gestión de residuos, sino también promover una economía circular en la región, transformando los desechos en recursos valiosos.

I. Introducción

La gestión de residuos orgánicos (RO) se ha convertido en uno de los mayores desafíos ambientales en las zonas urbanas y semiurbanas, especialmente en regiones como Baja California, donde la falta de infraestructura adecuada para su tratamiento ha llevado a la disposición directa de estos desechos en vertederos. Esta práctica no solo genera impactos ambientales negativos, como la contaminación del suelo y del agua por lixiviados, sino que también contribuye significativamente a la emisión de gases de efecto invernadero, principalmente metano, producto de la descomposición anaerobia de los residuos (Cabrera Rivas, 2020). En el caso específico de Ensenada, ciudad costera con una creciente actividad turística y comercial, la generación de residuos orgánicos provenientes de restaurantes, áreas verdes y servicios de alimentos representa un problema crítico que requiere soluciones innovadoras y sostenibles. A nivel municipal, los residuos sólidos urbanos (RSU) recolectados en Ensenada en 2020 fueron aproximadamente 355,660 kg diarios. De ese total, se estima que entre el 40 % y el 50 % corresponde a residuos orgánicos (SEMARNAT, 2020). Este dato sugiere que diariamente se generan más de 140 toneladas de residuos orgánicos en el municipio, lo que pone en evidencia la urgencia de implementar modelos de aprovechamiento con enfoque ambiental y circular.

En este contexto, la revalorización de residuos orgánicos mediante procesos biológicos se presenta como una alternativa prometedora. Técnicas como el lombricompostaje y la biotransformación con larvas de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) han demostrado ser

eficientes en la reducción de volúmenes de residuos y en la producción de subproductos de alto valor, como fertilizantes orgánicos y proteínas para alimentación animal (Cabrera Gutiérrez & López Gutiérrez, 2021). Sin embargo, la implementación de estos sistemas en condiciones reales, como las de Ensenada, requiere de un análisis detallado de su viabilidad, considerando las condiciones ambientales locales y las características específicas de los residuos generados.

El presente trabajo tiene como objetivo realizar una revisión bibliográfica exhaustiva sobre el uso combinado de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) y la mosca soldado negra en la revalorización de residuos orgánicos, con el fin de justificar la implementación de un sistema integrado para la región. Además, se propone un protocolo experimental para la estandarización de este sistema, considerando las condiciones climáticas y los retos de logísticos de implementación en Ensenada. Este trabajo se orienta al análisis documental y exploratorio de un modelo para el aprovechamiento de residuos orgánicos mediante el uso de mosca soldado negro y lombricomposta. La propuesta busca sentar las bases para futuras estrategias que, tras su validación y aplicación piloto contribuya a la mitigación de impactos ambientales y al aprovechamiento económico de subproductos, en línea con los principios de la economía circular.

El objetivo principal de esta revisión es evaluar, a partir de la literatura científica, la eficiencia de ambos organismos en la biotransformación de residuos orgánicos, identificar las condiciones óptimas para su funcionamiento y analizar los desafíos asociados a su implementación en contextos urbanos y semiurbanos. Asimismo, identificar brechas de conocimiento en las dimensiones técnica, social y normativa, con miras a proponer ajustes que favorezcan la adecuada adaptación de los sistemas al contexto local. Finalmente, presentar una propuesta experimental que servirá como base para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en Ensenada, con el objetivo de establecer un modelo replicable y sostenible para la gestión de residuos orgánicos.

II. Marco teórico

1. Procesos de transformación de residuos orgánicos

La transformación de residuos orgánicos es un proceso biológico en el que los desechos de origen biológico, como restos de alimentos, vegetales, subproductos agrícolas y desechos de jardinería, son descompuestos y convertidos en productos de valor agregado, como fertilizantes orgánicos, biogás o proteínas. Este proceso es fundamental para reducir la cantidad de residuos que llegan a los vertederos y para promover la economía circular, donde los desechos se convierten en recursos útiles (Oviedo Olvera & García Trejo, 2022).

En este contexto, los principales procesos asociados a la transformación de residuos orgánicos son los siguientes:

Compostaje: Es un proceso aeróbico en el que los microorganismos descomponen la materia orgánica en presencia de oxígeno, generando un producto final llamado compost, que es rico en nutrientes y puede ser utilizado como fertilizante. Este proceso requiere de condiciones controladas de temperatura (entre 50°C y 70°C), humedad (alrededor del 60%) y aireación para ser eficiente. El compostaje es una de las técnicas más utilizadas a nivel mundial debido a su simplicidad y bajo costo (Anda-Trasviña et al., 2021).

Lombricompostaje: Es una variante del compostaje en la que se utilizan lombrices, como la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*), para acelerar la descomposición de la materia orgánica. Las lombrices consumen los residuos y los transforman en humus, un fertilizante orgánico de alta calidad que mejora la estructura del suelo, su capacidad de retención de agua y su fertilidad. Este proceso es más rápido que el compostaje tradicional y genera un producto de mayor calidad (Cabrera Rivas, 2020).

Biotransformación con insectos: Este proceso utiliza insectos, como la mosca soldado negra (*Hermetia illucens*), para descomponer residuos orgánicos. Las larvas de estos insectos son capaces de consumir grandes cantidades de residuos en un corto período de tiempo, reduciendo su volumen y generando biomasa rica en proteínas y lípidos, que puede ser utilizada como alimento para animales. Además, el residuo generado por las larvas puede ser utilizado como sustrato para otros procesos, como el lombricompostaje (Cabreta Gutiérrez & López Gutiérrez, 2021).

Considerando la importancia de la biotransformación de los RO, a continuación se enfatizan estos procesos, mediante la descripción de los organismos que la realizan.

2. Lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*)

La lombriz roja californiana es una especie de lombriz ampliamente utilizada en la lombricultura debido a su alta eficiencia en la descomposición de residuos orgánicos y su capacidad para producir humus de alta calidad. Esta especie es originaria de Europa, pero se ha adaptado a diversas condiciones climáticas, lo que la hace ideal para su uso en sistemas de gestión de residuos en diferentes regiones (Lohri et al., 2017).

Características biológicas: La lombriz roja californiana es un organismo detritívoro, es decir, se alimenta de materia orgánica en descomposición. Puede consumir diariamente una cantidad de residuos equivalente a su propio peso, lo que la convierte en una opción eficiente para la gestión de residuos orgánicos. Además, es una especie muy resistente y adaptable, capaz de sobrevivir en condiciones de cautiverio y en una amplia gama de temperaturas (Cabrera Rivas, 2020).

Proceso de lombricompostaje: Durante este proceso, las lombrices ingieren los residuos orgánicos y los transforman en humus a través de su sistema digestivo. El humus producido es rico en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, y contiene microorganismos beneficiosos que mejoran la salud del suelo y promueven el crecimiento de las plantas. Además, el humus tiene un pH neutro y una alta capacidad de retención de agua, lo que lo convierte en un fertilizante ideal para la agricultura orgánica (Oviedo et al., 2022).

Condiciones óptimas para la biotransformación de RO:

Para que la lombriz roja californiana funcione de manera eficiente, es necesario mantener condiciones adecuadas de temperatura (entre 15°C y 25°C), humedad (alrededor del 80%) y pH (entre 6 y 8). Además, el sustrato debe estar libre de sustancias tóxicas y tener una proporción adecuada de carbono y nitrógeno (Liu et al., 2023).

Ciclo de vida: El ciclo de vida de la lombriz roja californiana consta de varias etapas: huevo, juvenil y adulto. Las lombrices son hermafroditas, lo que significa que cada individuo tiene órganos reproductivos masculinos y femeninos, pero necesita aparearse con otra lombriz para reproducirse. Después del apareamiento, las lombrices depositan sus huevos en cápsulas llamadas cocones, que contienen varias lombrices en desarrollo. El tiempo de desarrollo desde el huevo hasta la etapa adulta es de aproximadamente 2 a 3 meses, dependiendo de las condiciones ambientales.

3. Mosca soldado negra (*Hermetia illucens*)

La mosca soldado negra es un insecto cuya fase larval es ampliamente utilizada en la biotransformación de residuos orgánicos. Sus larvas son capaces de consumir una amplia variedad de residuos, incluyendo restos de alimentos, subproductos agrícolas y desechos de origen biológico, lo que las convierte en un organismo ideal para el pretratamiento de residuos.

Características biológicas: Las larvas de la mosca soldado negra son altamente eficientes en la descomposición de residuos orgánicos, pudiendo consumir grandes cantidades de materia en un

corto período de tiempo. Además, son ricas en proteínas y lípidos, lo que las convierte en una fuente potencial de alimento para la industria ganadera y acuícola. Un aspecto destacado de este organismo es su capacidad para adaptarse a residuos de diversas composiciones, incluyendo restos de alimentos y subproductos de aceites, lo que lo convierte en un pretratador versátil en sistemas de biotransformación (Cabreta Gutiérrez & López Gutiérrez, 2021).

Proceso de biotransformación: Durante este proceso, las larvas consumen los residuos orgánicos y los transforman en un sustrato parcialmente degradado, que puede ser utilizado como alimento para otros organismos, como las lombrices rojas californianas. Además, las larvas mismas pueden ser cosechadas y utilizadas como fuente de proteínas. Este proceso no solo reduce el volumen de residuos, sino que también genera productos de alto valor comercial (Oviedo et al., 2022).

Ciclo de vida: El ciclo de vida de la mosca soldado negra consta de cuatro etapas: huevo, larva, pupa y adulto. Las hembras adultas depositan sus huevos en masas sobre superficies cercanas a fuentes de alimento, como residuos orgánicos. Las larvas eclosionan después de 3 a 4 días y comienzan a alimentarse de los residuos. La fase larval dura aproximadamente 2 semanas, durante las cuales las larvas consumen grandes cantidades de materia orgánica. Después de la fase larval, las larvas se transforman en pupas, que eventualmente emergen como adultos. Los adultos no se alimentan y su principal función es reproducirse (Oviedo et al., 2022).

Condiciones óptimas: Las larvas de mosca soldado negra son altamente adaptables a diferentes condiciones ambientales, pero su eficiencia máxima se alcanza en temperaturas entre 25°C y 30°C y con niveles de humedad adecuados entre 60% y 80%. Además, requieren de un sustrato con una proporción equilibrada de nutrientes para su desarrollo óptimo (Liu et al., 2023).

4. Ensamble de sistemas de biotransformación y casos de éxito para el tratamiento de residuos orgánicos.

La implementación de sistemas de biotransformación de residuos orgánicos utilizando la lombriz roja californiana y la mosca soldado negra ha demostrado ser exitosa en diversos contextos, tanto a nivel experimental como en aplicaciones prácticas. A continuación, se presentan algunos casos de éxito que destacan los parámetros clave y los resultados.

4.1. Estudio de Sebayang et al. (2022): Bio-Vermigot (vermicompost y kasgot)

En un estudio realizado por Sebayang et al. (2022), se evaluó la combinación de la lombriz roja californiana y la mosca soldado negra para la producción de un fertilizante orgánico llamado Bio-

Vermigot, que combina vermicompost (producido por lombrices) y kasgot (producido por larvas de mosca soldado negra). Los resultados mostraron que el pH del compost producido varió entre 6.3 y 8.2, siendo la mayoría de los tratamientos neutros (6.7–7.2), lo que cumple con los estándares nacionales para fertilizantes orgánicos.

Contenido de humedad: Todos los tratamientos superaron el 25% de humedad, lo que indica que el proceso de biotransformación mantuvo un ambiente húmedo adecuado para los organismos.

Nitrógeno (N): El tratamiento con 100% lombrices y estiércol de vaca alcanzó un contenido de nitrógeno del 2.45%, mientras que el tratamiento con 100% larvas de mosca soldado negra y estiércol de vaca alcanzó un 2.05%, ambos dentro de los estándares nacionales.

Fósforo (P): El tratamiento con 100% larvas de mosca soldado negra y estiércol de vaca produjo el mayor contenido de fósforo (2.68%), seguido por el tratamiento con 25% lombrices y 75% larvas de mosca soldado negra con residuos de tallos de plátano (2.47%).

Relación C/N: Aunque la relación C/N en todos los tratamientos fue inferior a 20 (por debajo del estándar nacional de 25), se observó que la combinación de ambos organismos redujo significativamente la relación C/N, lo que indica una descomposición eficiente de la materia orgánica.

Este estudio demostró que la combinación de lombrices y larvas de mosca soldado negra puede producir un fertilizante orgánico de alta calidad, con un contenido nutricional adecuado para su uso en la agricultura.

4.2. Estudio de Fadhillah y Bagastyo (2020): Reducción de residuos orgánicos con larvas de mosca soldado negra

En otro estudio realizado por Fadhillah y Bagastyo (2020), se evaluó la eficacia de las larvas de mosca soldado negra en la reducción de residuos orgánicos. Los resultados mostraron:

Reducción de residuos: Las larvas de mosca soldado negra fueron capaces de reducir hasta un 50% del volumen de residuos orgánicos en un período de 14 días.

Contenido de proteínas: Las larvas produjeron una biomasa con un contenido proteico de 9.21%, un valor aún por debajo de los niveles comúnmente reportados para *Hermetia illucens*, que suelen superar el 30%. No obstante, este resultado sugiere una oportunidad para optimizar las condiciones del sistema y aumentar su valor como fuente de proteína para alimentación animal.

pH del compost: El pH del compost producido por las larvas se mantuvo en un rango de 6.0 a 7.0, lo que indica un ambiente ligeramente ácido a neutro, ideal para la descomposición de residuos.

4.3. Estudio de Ramnarin et al. (2019): Vermicompostaje con *Eisenia foetida*

Contenido de nutrientes: El vermicompost producido contenía niveles significativos de nitrógeno (1.57%), fósforo (1.61%) y potasio (0.93%), lo que lo convierte en un fertilizante orgánico de alta calidad.

Relación C/N: La relación C/N del vermicompost fue de 13, lo que indica una descomposición eficiente de la materia orgánica.

Mejora del suelo: La aplicación del vermicompost mejoró significativamente la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

5. Marco normativo

La gestión de residuos orgánicos y la producción de subproductos, incluyendo los fertilizantes, generados a partir de estos desechos están reguladas por una serie de normas y leyes a nivel nacional, estatal y local. Estas regulaciones buscan garantizar la calidad de los productos generados, proteger el medio ambiente y promover prácticas sostenibles (SEMARNAT, 2013).

Nivel nacional (México):

5.1 La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)

Es el marco normativo central para regular la gestión de residuos en México. Publicada originalmente en 2003 y actualizada hasta su última reforma en mayo de 2023 (DOF, 2023), esta ley establece bases para garantizar el derecho a un medio ambiente sano y promover el desarrollo sustentable mediante la prevención, valorización y manejo integral de residuos, incluyendo sólidos urbanos, orgánicos, peligrosos, mineros, metalúrgicos y de manejo especial (Art. 1).

Las definiciones dentro de la LGPGIR son:

Clasificación de residuos: Subdivide los residuos sólidos urbanos en orgánicos e inorgánicos para facilitar su separación primaria y secundaria (Art. 18), e integra categorías específicas como

residuos mineros (provenientes de explotación de minerales) y metalúrgicos (de fundición y refinación de metales), sujetos a planes de manejo (Arts. 17, 5 fracciones XXX Bis y XXX Bis 1).

Principios rectores: Incluyen la prevención de la generación de residuos, responsabilidad compartida entre productores, consumidores y autoridades, valorización (reincorporación en procesos productivos) y acceso público a la información (Arts. 2 y 5).

Planes de manejo: Obligatorios para residuos peligrosos (como aceites, pilas y fármacos), así como para grandes generadores de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, promoviendo la reducción en la fuente, reciclaje y co-procesamiento (Arts. 27-33).

Coordinación intergubernamental: Define competencias de la Federación, entidades federativas y municipios. Por ejemplo, los municipios son responsables de la recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos, mientras la Federación regula residuos peligrosos y mineros (Arts. 7, 9 y 10).

Tecnologías limpias: Fomenta la termovalorización (aprovechamiento de residuos orgánicos para generar energía) y el co-procesamiento (uso de residuos como insumos en procesos industriales), bajo criterios de eficiencia ambiental y económica (Arts. 5 fracción XLIII y 62 Bis).

Sanciones y remediación: Establece multas, clausuras y medidas de seguridad para infracciones, además de responsabilizar a generadores y gestores por la contaminación de sitios, exigiendo su remediación (Arts. 68-77 y Título Séptimo).

Esta ley, se vincula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, y busca transformar el modelo lineal de residuos hacia uno circular, priorizando la reducción, reutilización y valorización, con enfoque en corresponsabilidad social y protección de la salud y ecosistemas (Art. 25 y 34).

5.2 Norma Mexicana NMX-FF-109-SCFI-2007

Establece los lineamientos y metodologías para la evaluación de la calidad del humus de lombriz, la cual lo clasifica en tres categorías: extra, primera y segunda. Esta clasificación se fundamenta en el análisis integral de sus características físicas, químicas y biológicas, garantizando así su idoneidad para aplicaciones agrícolas y ambientales.

Entre los parámetros críticos definidos por la norma destacan:

- Un contenido mínimo de materia orgánica del 30% (base seca).
- Un pH en el rango de 6.0 a 8.0.
- Una relación carbono/nitrógeno (C/N) inferior a 20.

- Ausencia de metales pesados y patógenos.

Adicionalmente, la norma especifica requisitos complementarios, que detallan los límites permisibles para cada categoría en aspectos como:

- Propiedades físicas: textura, humedad y granulometría.
- Propiedades químicas: macro y micronutrientes (N, P, K, Ca, Mg), conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico.
- Propiedades microbiológicas: concentración de microorganismos benéficos y actividad enzimática.

El cumplimiento de estos criterios asegura no solo la calidad agronómica del producto, sino también su sostenibilidad ambiental, posicionando al humus de lombriz como un insumo clave en sistemas de producción orgánica y agricultura regenerativa.

Nivel estatal para Baja California:

5.3 Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos para el Estado de Baja California (LPGIRBC)

Establece un marco normativo integral para la prevención, valorización y gestión de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Entre sus disposiciones clave, destaca la promoción del composteo, definido como el proceso de descomposición de materia orgánica mediante microorganismos, como la práctica esencial para transformar residuos orgánicos en mejoradores de suelo o fertilizantes, responsabilizando a los municipios de implementar programas para su elaboración y consumo (Art. 4, 21 y 23). Asimismo, la ley enfatiza la participación activa de los municipios en la formulación de Programas Municipales para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos, que incluyen estrategias de separación, recolección diferenciada y desarrollo de infraestructura para valorización, como plantas de selección y centros de acopio (Art. 6, 8 y 18-20).

Adicionalmente, la ley prohíbe prácticas nocivas como la quema de residuos a cielo abierto (excepto en casos específicos autorizados) y el vertido en sitios no controlados, imponiendo sanciones que van desde multas hasta clausuras (Art. 15 y 31-35). También establece obligaciones claras para generadores, como la separación de residuos, registro ante autoridades y presentación de planes de manejo, trasladando responsabilidades a prestadores de servicios autorizados (Art. 10-14).

Aunque no menciona explícitamente la lombricultura, esta podría englobarse dentro de las técnicas de composteo, especialmente en el ámbito municipal y particular (Art. 23). La ley

también aborda la remediación de suelos contaminados (Art. 26-27 bis) y fomenta la creación de mercados para materiales reciclados, coordinando esfuerzos con el sector privado (Art. 25).

Esta normativa, reformada por última vez en 2019, refleja un enfoque transversal que integra principios ambientales, participación social y criterios técnicos para una gestión sostenible de residuos (Gobierno de Baja California, 2019).

Nivel local para el municipio de Ensenada:

5.4 Reglamento para el Control de la Calidad Ambiental del Municipio de Ensenada, Baja California

Este reglamento establece un marco normativo integral para la gestión ambiental en el municipio, con énfasis en la prevención y control de la contaminación, así como en la preservación de los recursos naturales. En materia de gestión de residuos sólidos urbanos, se contemplan disposiciones específicas:

→ Separación y valorización de residuos:

Se obliga a la separación de residuos orgánicos e inorgánicos mediante técnicas manuales o mecánicas para su reciclaje, tratamiento o confinamiento final (Artículo XXXIV).

Los residuos orgánicos deben someterse a procesos de composteo, mientras que los no compostables, hospitalarios o de rechazo se destinan a rellenos sanitarios (Artículo 61-62).

Los establecimientos comerciales, hospitales y centros de servicios deben contar con contenedores específicos para residuos y comprobar su disposición final mediante documentos fiscales (Artículo 43 Bis y 43 Ter).

→ Tecnologías limpias y tratamiento de residuos:

Se promueve la instalación de plantas procesadoras de residuos sólidos y rellenos sanitarios que cumplan con normas técnicas para evitar impactos ambientales (Artículo 60).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales deben operar bajo límites máximos permisibles, con equipos certificados para reducir contaminantes (Artículo 18).

→ Participación ciudadana y responsabilidades:

Los habitantes están obligados a mantener la limpieza de espacios públicos, separar residuos en bolsas resistentes y depositarlos en contenedores dentro de sus predios (Artículo 44 Bis).

Se fomenta la creación de centros de acopio y programas de reutilización de materiales reciclables, en colaboración con empresas y organismos públicos o privados (Artículo 47).

La Dirección de Ecología promueve campañas de educación ambiental para generar conciencia ecológica en la población (Capítulo VIII, Artículo 136-137).

6. Economía circular y sostenibilidad

Lo anteriormente descrito se enmarca en la dinámica de la economía circular, que se define como un modelo económico que busca minimizar la generación de residuos y maximizar el aprovechamiento de los recursos, promoviendo la reutilización, el reciclaje y la valorización de los desechos (Morseletto, 2020). En este contexto, la biotransformación de residuos orgánicos mediante el uso de la lombriz roja californiana y la mosca soldado negra se alinea con los principios de la economía circular, ya que transforma los residuos en productos de valor agregado, como fertilizantes orgánicos y proteínas, que pueden ser utilizados en la agricultura y la industria alimentaria (Cabrera Gutiérrez & López Gutiérrez, 2021).

La implementación de sistemas de biotransformación de residuos orgánicos reduce la cantidad de desechos enviados a vertederos, disminuyendo la contaminación del suelo, el agua y el aire. Además, contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, como el metano, que se generan durante la descomposición anaerobia de los residuos en vertederos (Anda-Trasviña et al., 2021).

Asimismo, los productos generados a través de la biotransformación de residuos orgánicos, como el humus de lombriz y la biomasa de larvas de mosca soldado negra, tienen un alto valor comercial en mercados agrícolas y de alimentación animal, lo que representa una oportunidad económica para las comunidades locales (Liu et al., 2023).

III. Antecedentes

La biotransformación de residuos orgánicos mediante el uso de organismos como la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) y la mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) ha ganado reconocimiento en los últimos años como un método sostenible y eficiente para la gestión de desechos orgánicos. Este enfoque se basa en la capacidad de estos organismos para descomponer residuos y producir productos de valor añadido, como fertilizantes orgánicos y proteínas de alta calidad, lo que ha llevado a su implementación en diversas aplicaciones de gestión ambiental y economía circular (Cabreta Gutiérrez & López Gutiérrez, 2021).

La lombriz roja californiana es una de las especies más utilizadas en la lombricultura, un proceso que transforma residuos orgánicos en humus, un fertilizante orgánico rico en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio. Este humus no solo mejora la fertilidad del suelo, sino que también contribuye a la retención de agua y a la mejora de la estructura del suelo, lo que lo convierte en un producto altamente valorado en la agricultura (Cabrera Rivas, 2020). Estudios previos han demostrado que la lombriz roja californiana es capaz de procesar grandes cantidades de materia orgánica en condiciones controladas, lo que la convierte en una opción viable para la gestión de residuos orgánicos en contextos urbanos y semiurbanos.

Por otro lado, la mosca soldado negra ha sido ampliamente estudiada por su capacidad para descomponer una amplia gama de residuos orgánicos, incluyendo restos de alimentos, subproductos agrícolas y desechos de origen biológico. Sus larvas son capaces de consumir grandes cantidades de residuos en un corto período de tiempo, reduciendo significativamente el volumen de desechos y generando biomasa rica en proteínas y lípidos, que puede ser utilizada como alimento para animales (Liu et al., 2023). Además, la mosca soldado negra es altamente adaptable a diferentes condiciones ambientales, lo que la convierte en un organismo ideal para el tratamiento de residuos en áreas urbanas e industriales.

En el contexto de la gestión de residuos orgánicos, diversos estudios han explorado la eficiencia de estos organismos en condiciones de laboratorio, donde variables como la temperatura, la humedad y el pH son cuidadosamente controladas para maximizar la eficacia del proceso (Oviedo et al., 2022). Sin embargo, la implementación de estos sistemas en condiciones reales, como las de Ensenada, Baja California, representa un desafío adicional debido a las fluctuaciones climáticas y las características específicas de los residuos generados en la región.

En el caso específico de Ensenada, la falta de infraestructura para el tratamiento de residuos orgánicos ha llevado a que estos desechos sean enviados directamente a vertederos, lo que genera impactos negativos en el medio ambiente y la salud pública (Aguilar-Virgen, Taboada-González & Armijo-de Vega, 2009). Instituciones educativas, como la UABC han implementado islas de separación de residuos, sin embargo, el manejo de los residuos orgánicos a escala institucional sigue siendo un reto, ya que no existe un sistema eficiente para su revalorización (UABC, 2023). Ante esta problemática, el uso combinado de la lombriz roja californiana y la mosca soldado negra se presenta como una solución prometedora, ya que permite no solo reducir el volumen de residuos, sino también generar productos de alto valor que pueden ser utilizados en la agricultura y la industria alimentaria (Del Hierro, Zambrano, & Sánchez, 2021).

A nivel nacional, existen varias empresas y programas gubernamentales que han implementado sistemas de transformación de residuos orgánicos, lo que demuestra que este enfoque es viable y tiene aplicaciones prácticas. Por ejemplo, la empresa BioFábrica Siglo XXI, con sede en México, se especializa en la producción de humus de lombriz a partir de residuos orgánicos, utilizando la lombriz roja californiana (Biofábrica, 2004). Esta empresa ha demostrado que es posible transformar desechos agrícolas y urbanos en fertilizantes orgánicos de alta calidad, contribuyendo a la economía circular y la agricultura sostenible.

Otra empresa relevante es InsectFit, que utiliza la mosca soldado negra para transformar residuos orgánicos en proteínas y grasas de alta calidad, que son utilizadas como alimento para animales (Brujulabike, 2020). Este enfoque no solo reduce el volumen de residuos, sino que también genera insumos valiosos para la industria alimentaria, lo que muestra el potencial económico y ambiental de la biotransformación de residuos.

En cuanto a programas gubernamentales, el Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos, impulsado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2022), ha promovido la separación, reciclaje y valorización de residuos sólidos urbanos, incluyendo los orgánicos. Algunos municipios han implementado proyectos de compostaje y lombricultura como parte de este programa, lo que ha permitido reducir la cantidad de residuos enviados a vertederos y promover la producción de fertilizantes orgánicos.

En el caso específico de Ensenada, el gobierno municipal ha mostrado interés en implementar programas de compostaje para gestionar los residuos orgánicos generados en la ciudad. Aunque aún está en desarrollo, este programa busca reducir la cantidad de residuos enviados a vertederos y promover la producción de fertilizantes orgánicos. Localmente, algunas instituciones educativas como la UABC han implementado islas de separación de residuos en su campus, lo que representa un primer paso hacia la gestión sostenible de residuos orgánicos a escala institucional (Sánchez Reyes, 2018). Lo anterior se ha combinado con la difusión de información y la promoción de las prácticas de tratamiento adecuado de los RO.

A nivel local, el programa de Reciclando Ensenada, promovido por el Ayuntamiento en coordinación con la Dirección de Administración Urbana, Ecología y Medio Ambiente, tiene como objetivo fomentar la cultura de la separación y reciclaje de residuos entre la población. Este programa facilita espacios específicos en distintos puntos de la ciudad donde los ciudadanos pueden depositar materiales reciclables como papel, cartón, plástico, aluminio y electrónicos. Además, incluye actividades de educación ambiental dirigidas a escuelas, empresas y la

comunidad en general, para incentivar prácticas sostenibles en el manejo de residuos (Ayuntamiento de Ensenada, 2024).

En Ensenada, aunque no existe una campaña específica de divulgación sobre la biotransformación de residuos orgánicos, la implementación de programas de compostaje y lombricultura a nivel municipal e institucional podría beneficiarse de iniciativas similares. La educación y participación ciudadana son clave para el éxito de cualquier sistema de gestión de residuos, por lo que sería recomendable desarrollar campañas de divulgación que promuevan la separación de residuos orgánicos y su transformación mediante técnicas como el uso de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) y mosca soldado negra (*Hermetia illucens*).

Planteamiento del problema

La gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) es uno de los mayores desafíos ambientales en las zonas urbanas y semiurbanas, especialmente en regiones como Baja California, donde la falta de infraestructura adecuada para su tratamiento ha llevado a la disposición directa de estos desechos en vertederos. En particular, los residuos orgánicos (RO), que representan aproximadamente el 50% del total de los RSU, son una fuente significativa de contaminación cuando no son gestionados adecuadamente. Su descomposición en vertederos genera lixiviados que contaminan el suelo y los cuerpos de agua, además de emitir gases de efecto invernadero, como el metano, que contribuyen al cambio climático (Cabrera Rivas, 2020).

En el caso específico de Ensenada, Baja California, este problema se agrava debido a la creciente actividad turística y comercial, que incrementa la generación de residuos orgánicos provenientes de restaurantes, áreas verdes y servicios de alimentos. También, las instituciones educativas enfrentan estos desafíos, según datos de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), en su campus Ensenada que incluyen las unidades de Punta morro y Valle dorado, se generan alrededor de 178 toneladas anuales de RSU, de las cuales el 80% corresponde a residuos orgánicos (UABC, 2023). A pesar de los esfuerzos por separar los residuos en islas de reciclaje, la falta de infraestructura para el tratamiento de RO a escala institucional y municipal ha llevado a que estos desechos sean enviados directamente a vertederos, lo que representa un problema ambiental y económico.

Además, la disposición inadecuada de los residuos orgánicos tiene impactos negativos en la calidad del suelo, el agua y el aire, afectando no solo al medio ambiente, sino también a la salud pública. Por ejemplo, los lixiviados provenientes de la descomposición de los RO pueden filtrarse en el suelo y contaminar los cuerpos de agua cercanos, lo que representa un riesgo para los ecosistemas marinos y la calidad del agua potable en una región costera como Ensenada

(Anda-Trasviña et al., 2021). Asimismo, la emisión de gases de efecto invernadero, generados en la transformación de residuos orgánicos, contribuye a la huella de carbono de la región, lo cual es especialmente preocupante en un contexto global de crisis climática.

Ante esta problemática, surgen técnicas de biotransformación de residuos orgánicos que ofrecen una alternativa sostenible y eficiente. Entre estas, el uso de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) y la mosca soldado negra (*Hermetia illucens*), que ha demostrado ser una buena alternativa, ya que ambos organismos son capaces de transformar los residuos orgánicos en productos de alto valor, como fertilizantes orgánicos y proteínas para alimentación animal (Cabreta Gutiérrez & López Gutiérrez, 2021). Sin embargo, la implementación de estos sistemas en condiciones reales, como las de Ensenada, requiere de un análisis detallado de su viabilidad, considerando las condiciones ambientales locales y las características específicas de los residuos generados.

IV. Justificación

La implementación de un sistema integrado de revalorización de residuos orgánicos mediante el uso de la lombriz roja californiana y la mosca soldado negra se justifica por su potencial para mitigar los impactos ambientales asociados a la mala gestión de residuos en Ensenada, Baja California. Este sistema no solo busca reducir el volumen de residuos enviados a vertederos, sino también generar productos de valor agregado que puedan ser utilizados en la agricultura y la industria alimentaria, contribuyendo así al desarrollo sostenible de la región.

En primer lugar, la biotransformación de residuos orgánicos mediante estos organismos ofrece una solución eficiente y de bajo costo para el tratamiento de desechos. La lombriz roja californiana es conocida por su capacidad para producir humus de alta calidad, un fertilizante orgánico que mejora la fertilidad del suelo y promueve la retención de agua (Cabrera Rivas, 2020). Por su parte, la mosca soldado negra es capaz de reducir rápidamente el volumen de residuos orgánicos y generar biomasa rica en proteínas, que puede ser utilizada como alimento para animales (Cabreta Gutiérrez & López Gutiérrez, 2021). Estos productos no solo tienen un alto valor comercial, sino que también contribuyen a la economía circular, transformando los residuos en recursos útiles.

En segundo lugar, la implementación de este sistema en Ensenada es especialmente relevante debido a las condiciones ambientales y logísticas de la región. La falta de infraestructura para el tratamiento de residuos orgánicos ha llevado a que estos desechos sean enviados directamente

a vertederos, lo que genera impactos negativos en el medio ambiente y la salud pública. Además, el clima semiárido de la región y las fluctuaciones de temperatura representan un desafío para la implementación de sistemas de biotransformación, por lo que es necesario evaluar la viabilidad de estos organismos en condiciones locales.

Finalmente, este trabajo busca contribuir al desarrollo de un modelo replicable y sostenible para la gestión de residuos orgánicos en Ensenada, que pueda ser adaptado a otras regiones con características similares. A través de una revisión bibliográfica exhaustiva y la propuesta de un protocolo experimental, se espera identificar las condiciones óptimas para la implementación del sistema, así como los ajustes necesarios para maximizar su eficiencia y adaptabilidad. Este enfoque no solo busca mitigar los impactos ambientales asociados a la mala gestión de residuos, sino también promover una economía circular en la región, transformando los desechos en recursos valiosos y sostenibles.

V. Objetivo general

Proponer un sistema integrado de revalorización de residuos orgánicos mediante el uso sinérgico de *Eisenia foetida* (lombriz roja californiana) y *Hermetia illucens* (mosca soldado negra)

Objetivos específicos

1. Realizar un análisis bibliográfico para identificar condiciones óptimas, productos y desafíos en el uso de la lombriz roja californiana y la mosca soldado negra para el tratamiento y revalorización de residuos orgánicos en Ensenada.
2. Diseñar un sistema de biotransformación de residuos orgánicos con base en MBSE (Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos), considerando las condiciones ambientales y socioeconómicas de Ensenada, Baja California.
3. Proponer un protocolo experimental para la estandarización del sistema de revalorización, que incluya recomendaciones para el diseño, operación y monitoreo del proceso, con el fin de optimizar su eficiencia y adaptabilidad a escala local.

VI. Metodología

Revisión bibliográfica sistemática

En esta fase se realizó un análisis crítico de la literatura científica sobre el uso de *Eisenia foetida* (lombriz roja californiana) y *Hermetia illucens* (mosca soldado negra) en la biotransformación de residuos orgánicos. En este análisis se busca conocer cuáles son las condiciones operativas óptimas (temperatura, humedad, pH, tipos de sustrato) para el cultivo de estos organismos, los productos generados (compost, biomasa proteica, biofertilizantes) y sus características y los principales desafíos técnicos, socioeconómicos y ambientales para el desarrollo de estos proyectos en entornos urbanos y semiurbanos.

El análisis se realizó considerando los siguientes criterios de búsqueda e inclusión: Estudios experimentales, revisiones sistemáticas y casos de aplicación publicados entre 2018 y 2022. Que se hayan realizado en zonas urbanas y semiurbanas, con énfasis en regiones de clima mediterráneo y árido (parecidas a las de Baja California), además de que el objetivo del trabajo sea hacia los mecanismos de biotransformación y la integración de los resultados en modelos de economía circular.

Los criterios de búsqueda de información fueron los siguientes:

- Bases de datos: Scopus, Web of Science, Google Scholar y ScienceDirect.
- Palabras clave: Residuos orgánicos, lombricomposta, mosca soldado negra, biotransformación, economía circular, gestión de residuos, Baja California.
- Criterios de inclusión: Estudios publicados en los últimos 10 años, en inglés o español, que aborden el uso de lombrices y moscas soldado negra en la gestión de residuos orgánicos.
- Criterios de exclusión: Estudios que no abordan directamente la biotransformación de residuos orgánicos o que no utilicen los organismos mencionados.

Para lo anterior se siguió el siguiente protocolo:

1. Búsqueda inicial y filtrado de los artículos por título y resumen.
2. Lectura y análisis de los artículos completos que cumplan con los criterios de inclusión.
3. Exclusión de aquellos que no sean relevantes para el objetivo de la revisión.
4. Elaboración de una base de datos con la información clave de cada estudio (autor, año, objetivo, metodología, resultados, conclusiones).

Diseño experimental mejorado

Para el diseño de un sistema integrado de gestión de residuos orgánicos, fundamentado en la revisión crítica de la literatura, y con el enfoque de la Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos (MBSE),. La metodología se estructura en tres fases:

1. Evaluación comparativa de los procesos individuales (lombricomposta y mosca soldado negra).
2. Propuesta de integración basada en sinergias identificadas en la literatura.
3. Validación teórica mediante indicadores reportados en estudios previos.

Se definieron 3 criterios a partir de revisiones sistemáticas, con el fin de proponer un sistema integrado de revalorización de residuos orgánicos mediante el uso combinado de la lombriz roja californiana y la mosca soldado negra en condiciones ambientales no controladas, típicas de Ensenada, Baja California. Particularmente se analizó la eficiencia de bioconversión de los casos revisados (% de residuos procesados), la viabilidad técnica (requerimientos de infraestructura) y la escalabilidad (aplicación en contextos urbanos/rurales).

El diseño que se propone busca determinar la capacidad de ambos organismos para procesar residuos orgánicos, posiblemente de origen restaurantero, así como identificar las condiciones óptimas para su funcionamiento en un contexto local.

VII. Resultados

Resultados de la búsqueda bibliográfica

Uno de los aspectos considerados durante el análisis fue la procedencia geográfica y temporal de los estudios, con el propósito de identificar los contextos regionales en los que se está desarrollando esta línea de investigación, así como las tendencias temporales asociadas. Este análisis permite valorar la pertinencia de los resultados en relación con entornos urbanos y semiurbanos de clima mediterráneo y árido, similares a los de la región de Baja California, México.

En términos geográficos, los estudios incluidos en la revisión provienen de una diversidad de países, destacando una fuerte representación de regiones asiáticas. Indonesia se posiciona como el país con mayor número de investigaciones relevantes (30%), seguido por China(20%) y Pakistán (20%). También se identificaron contribuciones significativas provenientes de India, Nepal, Rusia y Ecuador(30%).

Respecto a la distribución temporal, la mayoría de los artículos revisados fueron publicados entre los años 2018 y 2024, con un pico de producción científica en 2021. Esta tendencia reciente indica

un creciente interés en el estudio de soluciones biotecnológicas para la gestión de residuos orgánicos, en línea con los principios de la economía circular, la sostenibilidad ambiental y la producción de bioinsumos como compost, biomasa proteica y biofertilizantes.

En conjunto, la diversidad geográfica y la actualidad temporal de los estudios analizados refuerzan la validez de los resultados extraídos, al integrar experiencias en distintos contextos socioterritoriales y climáticos. Además, este enfoque comparativo contribuye a identificar oportunidades y desafíos para la implementación de tecnologías de biotransformación en regiones como Baja California, donde las condiciones ambientales y urbanas presentan similitudes relevantes con los estudios revisados.

Las tablas presentadas en el documento ofrecen una visión integral sobre el uso de *Eisenia foetida* y *Hermetia illucens* en la biotransformación de residuos orgánicos, permitiendo identificar tanto las condiciones técnicas ideales como los productos generados y los desafíos involucrados. Su análisis resulta fundamental para contextualizar y validar el modelo propuesto en la tesis, especialmente si se considera su aplicación en regiones de clima árido como Baja California.

La tabla 1 resume las condiciones operativas óptimas para el desarrollo de los organismos estudiados. Por ejemplo, se indica que *Eisenia foetida* requiere temperaturas entre 20 y 30 °C, humedad relativa entre 70 y 90 %, y un pH entre 6.5 y 8.0, condiciones que coinciden con ambientes moderadamente húmedos y templados, ideales para procesos de vermicompostaje. En contraste, *Hermetia illucens* puede operar en temperaturas más elevadas (25–35 °C) y con menor humedad (60–80 %), lo cual la vuelve adecuada para el tratamiento de residuos en climas cálidos. Cabe destacar que el sistema combinado (mosca + lombrices) comparte rangos intermedios de temperatura y humedad, lo que refuerza su potencial para adaptarse a entornos variables y aprovechar sinergias entre ambos organismos.

Tabla 1. Variables críticas para el cultivo de los dos organismos objetivo de estudio. Rahman et al., 2020; Maharjan et al., 2023, Zhang et al., 2021; Salam et al., 2022; Del Hierro et al., 2021, Sebayang et al., 2022

Organismo	Temperatura (°C)	Humedad (%)	pH
<i>Eisenia foetida</i>	20–30	70–90	6.5–8.0
<i>Hermetia illucens</i>	25–35	60–80	6.0–8.5

Por su parte, la tabla 2 detalla los productos generados en la transformación de RO a partir de los diferentes organismos y sus respectivas aplicaciones. El vermicompost producido por *Eisenia foetida* se caracteriza por un alto contenido de nitrógeno, una relación carbono/nitrógeno balanceada, y estabilidad en su composición, lo que lo convierte en un fertilizante orgánico ideal para la recuperación de suelos. *Hermetia illucens*, en cambio, genera una biomasa proteica de alto valor, con entre 30 y 45 % de proteína y un contenido relevante de lípidos, lo que permite su uso como alimento animal o insumo para biodiésel. Adicionalmente, el frass de la mosca aporta nutrientes esenciales (N,P,K) y puede emplearse como biofertilizante. Cuando se integran ambos organismos, se obtiene un compost híbrido con textura fina y mejor contenido de nitrógeno y fósforo, útil tanto en agricultura como en horticultura urbana.

Tabla 2. Productos valorizables obtenidos de sistemas que incluyen a la Lombriz Roja Californiana o la Mosca Soldado Negra. Rahman et al., 2020; Maharjan et al., 2023, Zhang et al., 2021; Salam et al., 2022, Widyastuti et al., 2021; Kumar et al., 2018, Sebayang et al., 2022.

Organismo	Producto generado	Características principales	Aplicaciones comunes
<i>Eisenia foetida</i>	Vermicompost	Alto en N, C estable, baja relación C/N	Fertilizante orgánico, recuperación de suelos
<i>Hermetia illucens</i>	Biomasa proteica	30–45% proteína, rica en lípidos	Alimento para peces, aves, biodiésel
<i>Hermetia illucens</i>	Biofertilizante (frass)	Rico en NPK, pH balanceado	Enmienda de cultivos, compostaje
BSF + lombrices	Compost híbrido	N y P mejorados, textura fina	Agricultura, horticultura urbana

Finalmente, la tabla 3 identifica los principales desafíos técnicos, socioeconómicos y ambientales que enfrentan los proyectos de biotransformación. En el ámbito técnico, destacan las dificultades para mantener condiciones ambientales constantes, la necesidad de segregar y pre tratar adecuadamente los residuos, y los retos asociados con la escalabilidad de los sistemas. En lo socioeconómico, se señalan barreras como la baja aceptación cultural del uso de insectos, la falta de regulación normativa y el limitado acceso a financiamiento. Desde la perspectiva ambiental, problemas como la contaminación cruzada, la emisión de olores y la producción de lixiviados en zonas urbanas representan riesgos significativos si los sistemas no son gestionados adecuadamente.

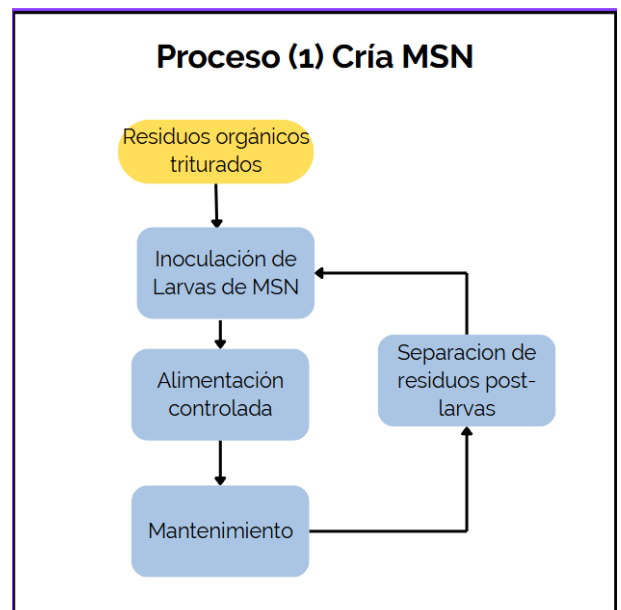
Tabla 3. Desafíos identificados para la implementación de sistemas de biotransformación. Del Hierro, Zambrano, & Sánchez, 2021, Janeeshma et al., 2024, Kumar, Sharma, & Prasad, 2018, Maharjan, Thapa, & Regmi, 2023, Guo, Wang, & Li, 2021, Antonov, Popov, & Dimitrov, 2020, Sebayang, Nasution, & Lubis, 2022.

Categoría	Desafíos identificados	Descripción
Técnicos	Control ambiental	Difícil mantener temperatura, humedad y pH óptimos
Técnicos	Selección y pretratamiento del sustrato	Segregación de residuos, evitar materiales tóxicos
Técnicos	Escalabilidad del sistema	Falta de infraestructura para pasar a escala industrial
Socioeconómicos	Aceptación cultural	Resistencia al uso de insectos como insumos
Socioeconómicos	Falta de regulación	Inexistencia de normas específicas para estos productos
Socioeconómicos	Acceso a financiamiento	Dificultades para obtener fondos públicos/privados
Ambientales	Contaminación cruzada	Riesgo de vectores si el sistema se maneja mal
Ambientales	Emisión de olores y lixiviados	Problemas en zonas urbanas por residuos húmedos

Resultados del Diseño experimental

El sistema propuesto combina la eficiencia de la mosca soldado negra (BSF) para degradar residuos de alta humedad con la capacidad de la lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*) para estabilizar material orgánico fibroso. Su diseño se estructura en cuatro etapas interconectadas:

- Clasificación de Residuos:
 - Entrada: Residuos orgánicos mixtos (urbanos/agroindustriales).
 - Proceso: Separación en dos flujos:
 - Flujo 1: Residuos de alta humedad (frutas, verduras, restos de comida) → Dirigidos a BSF.
 - Flujo 2: Residuos fibrosos (cartón, estiércol, hojas secas) → Dirigidos a lombricomposta.
 - Herramientas: Trituradora mecánica, sensores de humedad inicial (meta: 60-80%).
- Proceso de Degradación por BSF:
 - Condiciones Operativas:
 - ◆ Temperatura: 25-30°C (controlada mediante invernaderos en climas semiáridos).
 - ◆ Tiempo: 5-10 días, dependiendo de la carga de residuos.
 - Salidas:
 - ◆ Biomasa larval: Rica en proteína ($\geq 45\%$), destinada a alimentación animal.
 - ◆ Residuo post-BSF: Material parcialmente degradado, transferido a lombricomposta.



- Lombricomposta:

→ Condiciones Operativas:

- ◆ pH: 6.5-8.0 (ajustado con adición de cal agrícola si es necesario).
- ◆ Relación C/N: 20-30 (equilibrada mediante mezcla de residuos post-BSF y material fibroso).

→ Salidas:

- ◆ Compost estabilizado: Cumple con NMX-FF-109 (materia orgánica $\geq 30\%$, metales pesados dentro de límites).
- ◆ Lixiviado: Líquido rico en nutrientes, reutilizado para riego o humectación de sustratos.

● Validación y Control de Calidad:

→ Muestreo: Según NMX-FF-109 (3 muestras compuestas por lote de 1-10 m³).

→ Parámetros Críticos:

- ◆ Humedad: 60-80% (método gravimétrico).
- ◆ pH: 6.5-8.5 (potenciómetro).
- ◆ Metales Pesados: Plomo ≤ 150 mg/kg, Cadmio ≤ 10 mg/kg (espectrometría de absorción).

Integración MBSE (Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos)

El modelo se sustenta en un enfoque MBSE, representado mediante diagramas SysML:

● Diagrama de Bloques:

○ Subsistemas:

- BSF: Contenedores con control térmico y humedad.
- Lombricomposta: Lechos modulares con aireación pasiva.
- Control Ambiental: Sensores IoT para monitorear pH, humedad y temperatura.

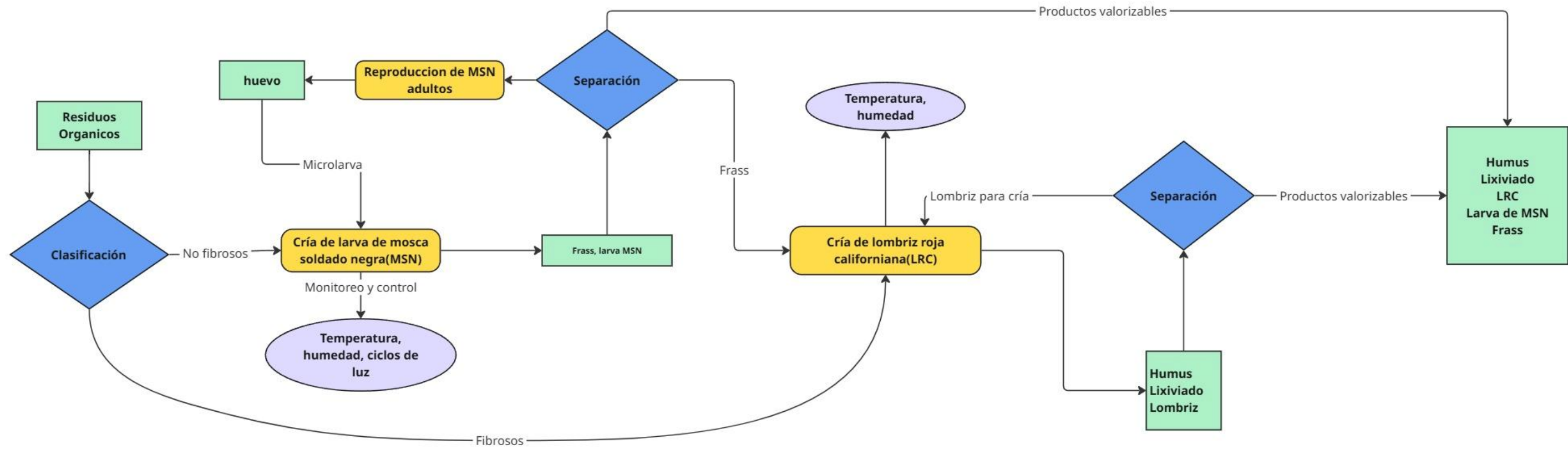
○ Interfaces:

- Flujo de residuos post-BSF hacia lombricomposta.
- Recirculación de lixiviado para humectación de sustratos.

- Diagrama de Actividades:

- Clasificación → Degradación BSF → Estabilización en Lombricomposta → Cosecha de Productos.
- Retroalimentación: Ajuste de parámetros en tiempo real mediante datos de sensores.

Modelo propuesto de bioconversión acoplado: Mosca Soldado Negra y Lombriz Roja Californiana



Validación Práctica y Normativa

- A. Protocolo Experimental
 - Preparación de Muestras:
 - Secado: Ambiente controlado ($\leq 35^{\circ}\text{C}$).
 - Tamizado: Malla de 2 mm.
 - Análisis Químicos:
 - Materia Orgánica: Método Walkley-Black.
 - Nitrógeno Total: Kjeldahl.

- B. Cumplimiento NMX-FF-109-SCFI-2007

Tabla 4. Requisitos y posibles acciones correctivas. NMX-FF-109-SCFI-2007, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, s.f.

Requisito	Criterio	Acción Correctiva
Ausencia de patógenos	Salmonella no detectable	Ajustar tiempos de compostaje.
Tamaño de partícula	≤ 12 mm (95% del material)	Molido adicional post-cosecha.
Estabilidad del compost	Relación C/N $\leq 25:1$	Mezclar con residuos ricos en carbono.

VIII. Discusiones

La propuesta de un sistema integrado de biotransformación de residuos orgánicos mediante el uso sinérgico de *Eisenia foetida* (lombriz roja californiana) y *Hermetia illucens* (mosca soldado negra) representa una alternativa viable y sostenible frente a los modelos convencionales de disposición de residuos en Ensenada, Baja California. Esta propuesta encuentra respaldo en estudios como el de Sebayang et al. (2022), quienes demostraron que la combinación de ambas especies como agentes descomponedores mejora significativamente las características químicas del compost producido. En contraste, el compostaje tradicional ha demostrado ser una estrategia efectiva para la valorización de residuos orgánicos mediante procesos aeróbicos controlados (Vargas-Pineda et al., 2019). Sin embargo, su implementación suele requerir mayores extensiones de terreno y tiempos de maduración más prolongados, lo que puede representar una limitante en contextos con alta densidad poblacional o disponibilidad reducida de espacio.

Este modelo se sustenta en la necesidad urgente de mejorar la gestión de residuos orgánicos en una región que enfrenta condiciones climáticas particulares y limitaciones estructurales para su tratamiento adecuado.

Ensenada presenta un clima semiárido con influencia mediterránea, caracterizado por temperaturas moderadas durante gran parte del año (entre 12 °C y 22 °C en promedio), con veranos cálidos e inviernos templados. Aunque estas condiciones se encuentran por debajo del rango óptimo mencionado por Yang-Jie et al. (2022), siguen siendo compatibles con el cultivo de las especies utilizadas. *Hermetia illucens*, por ejemplo, presenta su mayor eficiencia de bioconversión en temperaturas que oscilan entre los 25 °C y 35 °C. *Hermetia illucens* opera óptimamente entre 25 °C y 35 °C, lo cual es alcanzable de manera natural durante buena parte del año, especialmente en primavera y verano. En los meses más fríos, la instalación de estructuras simples como invernaderos solares permitiría mantener condiciones térmicas adecuadas. Por su parte, *Eisenia foetida* se desarrolla mejor entre 15 °C y 25 °C, rango fácilmente alcanzable en la mayor parte del año en la región. De esta forma, las condiciones climáticas de Ensenada no solo son compatibles con la implementación del sistema, sino que incluso pueden ser aprovechadas para reducir el uso de energía en el control ambiental. Además, según Maharjan et al. (2023), esta especie presenta una notable tolerancia a un amplio rango de temperaturas y condiciones ambientales, lo que refuerza su idoneidad para sistemas de vermicompostaje en diversas regiones.

La escasez de agua en Baja California, particularmente en zonas semiáridas como Ensenada, representa un desafío para mantener la humedad óptima en sistemas de lombricompostaje

(García Gómez, 2018). Sin embargo, el uso de residuos orgánicos con alto contenido de humedad, como frutas y verduras, facilita este control y promueve la eficiencia del proceso, al favorecer la descomposición y el desarrollo de *Eisenia foetida* (Pant & Yami, 2008).

La disponibilidad de residuos orgánicos en Ensenada es otro aspecto que favorece la implementación del sistema. Diversas fuentes generan cantidades significativas de residuos orgánicos: restaurantes, cocinas industriales, mercados, áreas verdes urbanas y zonas habitacionales. Por ejemplo, en el campus de la Universidad Autónoma de Baja California se producen aproximadamente 178 toneladas anuales de residuos sólidos, de los cuales cerca del 80 % corresponde a materia orgánica biodegradable. Estos residuos incluyen desde restos de alimentos hasta residuos vegetales y de poda, que pueden ser clasificados y dirigidos a diferentes etapas del sistema según su humedad, contenido de lignina y composición. Los residuos húmedos pueden ser tratados inicialmente por las larvas de *Hermetia illucens*, mientras que los residuos fibrosos y los subproductos del pretratamiento pueden ser estabilizados posteriormente mediante lombricompostaje.

Desde un enfoque técnico, la implementación combinada del sistema permite aprovechar las fortalezas de cada especie: mientras la mosca soldado negra actúa eficazmente sobre residuos con alto contenido de humedad en etapas iniciales, la lombriz roja californiana mejora la estabilización y maduración del material orgánico. Esta sinergia reduce significativamente la relación C/N y mejora la textura y calidad del compost, como lo demuestran estudios recientes sobre sistemas híbridos. Los productos obtenidos —biomasa proteica, vermicompost y biofertilizantes líquidos— son adecuados para su comercialización local y su uso en la agricultura regional, contribuyendo así al desarrollo de una economía circular.

A nivel normativo, el modelo se alinea con la legislación ambiental vigente a nivel nacional (LGPGIR), estatal (LPGIRBC) y municipal (Reglamento de Calidad Ambiental de Ensenada), que promueven la separación, tratamiento y valorización de residuos orgánicos. Asimismo, el cumplimiento de la norma NMX-FF-109-SCFI-2007 garantiza la calidad del vermicompost, lo que fortalece la viabilidad comercial del sistema. No obstante, persisten desafíos regulatorios relacionados con la ausencia de normativas específicas para el uso de insectos en el tratamiento de residuos, lo cual subraya la necesidad de actualizar los marcos legales y fomentar el reconocimiento institucional de estas tecnologías.

Desde una perspectiva ambiental y socioeconómica, este sistema puede contribuir significativamente a mitigar la presión sobre los vertederos locales, reducir la emisión de gases de efecto invernadero, y fomentar una nueva cadena de valor mediante la comercialización de

fertilizantes y proteínas alternativas. Además, su modularidad y escalabilidad lo hacen apto tanto para instalaciones comunitarias como para desarrollos institucionales o agroindustriales. La implementación exitosa del sistema dependerá de la inversión en infraestructura básica, la capacitación técnica de los operadores, la educación ambiental de la comunidad, y la articulación con políticas públicas orientadas a la sostenibilidad.

En conjunto, el análisis realizado demuestra que el sistema propuesto es técnica, ambiental y socialmente viable para su aplicación en Ensenada. Su éxito dependerá de su adaptación contextual y del compromiso multisectorial para promover soluciones locales basadas en la revalorización de residuos y en el aprovechamiento sostenible de los recursos biológicos disponibles.

IX. Conclusiones

La gestión inadecuada de residuos orgánicos en Ensenada, Baja California, representa un problema ambiental, logístico y social que requiere soluciones innovadoras y adaptadas a las condiciones locales. En este contexto, la implementación de un sistema de biotransformación basado en el uso combinado de *Hermetia illucens* (mosca soldado negra) y *Eisenia foetida* (lombriz roja californiana) se presenta como una alternativa viable, replicable y sostenible para la revalorización de residuos orgánicos en entornos urbanos y semiurbanos.

La revisión bibliográfica sistemática demostró que ambos organismos poseen capacidades complementarias para la transformación de materia orgánica. Las larvas de *H. illucens* permiten una degradación acelerada de residuos húmedos, generando biomasa proteica de alto valor y un sustrato parcialmente estabilizado, mientras que *E. foetida* completa la transformación del material en compost de calidad, cumpliendo con los criterios establecidos en la norma NMX-FF-109-SCFI-2007. Esta sinergia no solo incrementa la eficiencia del sistema, sino que también diversifica los productos finales, haciéndolo económicamente atractivo.

Las condiciones ambientales de Ensenada —particularmente su clima templado semiárido— son compatibles con los rangos óptimos de temperatura y humedad requeridos por ambos organismos. Sin embargo, aunque en términos generales no es estrictamente necesario implementar sistemas complejos de climatización para asegurar una producción eficiente, sí es recomendable contar con mecanismos básicos de control ambiental, como sombreaderos, estructuras de protección, monitoreo de temperatura y humedad, o microambientes adaptados. Esto garantiza la estabilidad del sistema ante fluctuaciones estacionales y permitiría mantener condiciones óptimas durante todo el año, maximizando la productividad y la calidad de los subproductos generados.

Asimismo, Ensenada cuenta con una abundante oferta de residuos orgánicos generados por restaurantes, mercados, áreas verdes e instituciones educativas. Esta disponibilidad de materia prima permite asegurar la alimentación constante del sistema y su operatividad sin interrupciones. La clasificación previa de los residuos según su humedad y composición es clave para dirigirlos a la fase correspondiente del sistema integrado, aumentando su eficiencia y reduciendo riesgos sanitarios o ambientales. Un ejemplo destacado es el caso de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) donde se ha documentado la generación significativa de residuos orgánicos e inorgánicos en sus unidades académicas, evidenciando su potencial para implementar este tipo de estrategias (Trebíl Hernández, 2022).

A nivel normativo, el modelo propuesto se encuentra respaldado por leyes y reglamentos en materia ambiental tanto nacionales como estatales, y sugiere una oportunidad clara para actualizar y complementar las regulaciones existentes con lineamientos específicos sobre el uso de insectos y técnicas de compostaje avanzadas en la gestión de residuos.

No obstante, para garantizar su viabilidad a largo plazo, será necesario abordar desafíos relacionados con la aceptación social del uso de insectos, la segregación adecuada de residuos, la educación ambiental y el fortalecimiento de capacidades técnicas. También será crucial impulsar estudios piloto que validen el sistema bajo condiciones reales, midan sus impactos ambientales y económicos, y generen datos locales que permitan escalar el modelo.

En conclusión, este trabajo establece las bases para el desarrollo de un sistema de gestión de residuos orgánicos que transforma un problema ambiental en una oportunidad de generación de valor, fortaleciendo los principios de economía circular, sostenibilidad y corresponsabilidad social. Su implementación en Ensenada no solo es factible, sino deseable, y representa un paso concreto hacia una gestión ambiental más eficiente, innovadora y resiliente.

LITERATURA CITADA

- 1. Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P. A., & Armijo-de Vega, C. (2009). Valorización de los reciclables en Ensenada, Baja California. Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California.
- 2. Anda-Trasviña, A. D., García-González, E., Pérez-Castro, A., Sánchez-Pérez, J., & Navarro-González, A. (2021). Residuos orgánicos: ¿basura o recurso? / Organic waste: garbage or resource? *Recursos Naturales y Sociedad*, 7(3).
- 3. Antonov, A., Popov, V., & Dimitrov, K. (2020). Cultural perceptions of insect-based composting. *International Journal of Social Ecology*, 12(2), 70–81.
- 4. Ayuntamiento de Ensenada. (2023). Programa Puntos Verdes. Dirección de Administración Urbana, Ecología y Medio Ambiente. <https://www.ensenada.gob.mx/?p=23171>
- 5. Biofábrica. (2004). Biofábrica: Biotecnología agrícola y ecológica para un campo sustentable. <https://biofabrica.com.mx/>
- 6. Brujulabike. (2020). Insectfit, las barritas energéticas de insectos que ya se venden en España. <https://www.brujulabike.com/insectfit-barritas-energeticas-insectos/>
- 7. Cabrera Rivas, A. (2021). Elaboración de lombricomposta con residuos orgánicos de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos utilizando lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*). Morelos.
- 8. Cabrera Gutiérrez, D. y López Gutiérrez, A. L. (2021) Evaluación de la larva de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) como alternativa para la degradación de residuos sólidos urbanos. [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres.
- 9. Del Hierro, A., Zambrano, J., & Sánchez, G. (2021). Innovaciones en la gestión de residuos orgánicos con insectos y lombrices. *Revista de Biotecnología Aplicada*, 38(2), 112–123.

- 10. Guo, Y., Wang, S., & Li, J. (2021). Challenges in industrial-scale insect bioconversion facilities. *Industrial Ecology Reports*, 8(2), 98–109.
- 11. Janeeshma, E., Habeeb, H., Sinha, S., Arora, P., Chattaraj, S., Das Mohapatra, P. K., Panneerselvam, P., & Mitra, D. (2024). Enzymes-mediated solid waste management: A sustainable practice for recycling. *Waste Management Bulletin*, 1, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.10.007>
- 12. Kumar, R., Sharma, S., & Prasad, D. (2018). Utilización de frass de *Hermetia illucens* como fertilizante alternativo. *Journal of Environmental Biotechnology*, 45(4), 200–209.
- 13. Liu, J., Shen, Y., Ding, J., Luo, W., Zhou, H., Cheng, H., ... Chen, K. (2023). High oil content inhibits humification in food waste composting by affecting microbial community succession and organic matter degradation. *Bioresource Technology*, 376.
- 14. López Rivas, J. A. (2023). Revalorización de residuos restauranteros mediante el uso de larva de mosca soldado negro.
- 15. Maharjan, A., Thapa, S., & Regmi, B. (2023). Vermicomposting efficiency of *Eisenia foetida* in high-altitude settings. *Sustainable Waste Management Journal*, 9(1), 33–41.
- 16. Maharjan, K. K., Noppradit, P., & Techato, K. (2023). Potential of *Eisenia fetida* (Redworm) for the conversion of three varieties of organic waste. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 12, 341–350.
- 17. Morsetto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553.
- 18. Rahman, M., Khatun, R., & Uddin, M. (2020). Effectiveness of vermicomposting on nutrient recovery from food waste. *Asian Journal of Environmental Science*, 15(3), 120–129.
- 19. Salam, A., Imran, M., & Yousaf, A. (2022). Barriers in scaling up black soldier fly larvae systems in South Asia. *Waste Technology Insights*, 7(2), 87–95.
- 20. Sebayang, Y., Nasution, A., & Lubis, R. (2022). Integrated composting system using *Hermetia illucens* and *Eisenia foetida* for banana stem waste. *Tropical Agricultural Research Journal*, 29(1), 45–54.
- 21. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). Manuales prácticos para la elaboración de bioinsumos 14: Humus de lombriz. <https://www.gob.mx/produccionparaelbienestar>
- 22. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2022–2024. Diario Oficial de la Federación.
- 23. Trébil Hernández, A. G. (2022). Percepción ambiental de la gestión integral de residuos en la Universidad Autónoma de Baja California, Campus Ensenada (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Baja California.

- 24. Vanessa Oviedo Olvera, M., García Trejo, F., & Gutiérrez Antonio, C. (2022). Mosca soldado-negra: Eslabón perdido en la cadena de revalorización de residuos orgánicos.
- 25. Vargas-Pineda, O. I., Trujillo-González, J. M., & Torres-Mora, M. A. (2019). El compostaje, una alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las centrales de abastecimiento. *Orinoquia*, 23(2), 123–129.
- 26. Widyastuti, T., Santoso, B., & Rachmawati, Y. (2021). Environmental concerns in BSFL-based organic waste treatment. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126403.
- 27. Yang-Jie, D., Xiang, F.-M., Tao, X.-H., Jiang, C.-L., Zhang, T.-Z., & Zhang, Z.-J. (2022). A full-scale black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) bioconversion system for domestic biodegradable wastes to resource. *Waste Management & Research*, 41(1), 143–154.
- 28. Zhang, Z., Liu, H., & Guo, Q. (2021). Evaluating bioconversion performance of BSFL across different substrates. *Applied Waste Science and Engineering*, 22(3), 144–155.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
Facultad de Ciencias Marinas
Facultad de Ciencias
Instituto de Investigaciones Oceanológicas

Título de la tesis

**PROPUESTA DE GESTIÓN SOSTENIBLE DE RESIDUOS ORGÁNICOS MEDIANTE
UN SISTEMA DE TRATAMIENTO ACOPLADO LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA-
MOSCA SOLDADO NEGRA.**

PRESENTA

Ricardo Gamiz Ramirez

Aprobado por:



Dr. Bernardino Ricardo Eaton
Gonzalez
Director(a)



Dr. José Ángel Olivas Valdez
Sinodal 1



Dra. Mary Carmen Ruiz de la Torre
Sinodal 2



Dra. Tatiana Montañó Soto
Sinodal 3