



Metodología de diseño de procesos para la reducción de residuos orgánicos de poliestireno expandido y vegetal utilizando larvas de *Zophobas morio* y *Tenebrio molitor*.

Proyecto de Título II

Para Optar al Título de Ingeniero Civil Ambiental

Y al Grado de Académico de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería.

GONZALO EDUARDO ÁLVAREZ ZAMORA

ROMINA MABEL GATICA GONZÁLEZ

Universidad de Playa Ancha

Profesor Guía: Dr. Patricio Méndez Quinteros

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	4
OBJETIVOS	7
Objetivo General	8
Objetivos específicos	8
Objetivo 1: Optimización del Proceso de Biodegradación	8
Objetivo 2: Diseño de un Modelo de Proceso Sostenible	8
Objetivo 3: Implementación a Gran Escala	8
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL OBJETO DE ESTUDIO	9
1.1. Planteamiento del problema	10
1.2. Antecedentes del estudio	11
1.3. Justificación del problema	12
1.4. Importancia de la investigación	13
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO DEL ESTUDIO	16
2.1 Caracterización de residuos	16
2.1.1 Residuos Sólidos Domiciliarios y Asimilables (RSDyA)	16
• Definición y magnitud del problema	16
• Impacto ambiental	17
2.1.2 Polímeros	18
• Definición y origen	18
• Impacto ambiental	18
2.1.3 Huella Hídrica y Huella de Carbono	19
Huella hídrica	19
Huella de carbono	20
2.1.4 Microplásticos	20
2.1.5 Poliestireno expandido (EPS)	21
2.2 Reducción de la contaminación plástica mediante biodegradación	23
• Factores que influyen en la biodegradación del plástico	26
• Estrategias de biodegradación de plástico con organismos vivos	27
• Adaptación de las especies a la biodegradación del plástico	27
CAPÍTULO 3: ESPECIES DE LARVAS	28
3.1 Zophobas morio	28
3.1.1 Ciclo de vida	29
3.1.2 Capacidad biodegradadora	30
3.1.3 Factores ambientales	31
3.2 Tenebrio molitor	33
3.2.1 Ciclo de vida	33
3.2.2 Capacidad biodegradadora	35
3.2.3 Factores ambientales	36

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	38
4.1 Metodología empleada en el cultivo de larvas de Zophobas morio	39
4.1.1 Pre-planificación experimental	40
4.1.2 Mantención de colonias de Zophobas morio	41
4.1.3 Cuantificación del consumo de EPS	45
4.1.4 Consumo de RBD por parte de Zophobas morio	47
4.2 Observaciones cualitativas en el experimento Zophobas morio	47
4.3 Metodología empleada en el cultivo de larvas de Tenebrio molitor	49
CAPÍTULO 5: MARCO LEGAL	50
5.1 Ley 19.300: Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente.	51
5.2 Ley 20.920 Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (Ley REP)	52
5.2.1 Responsabilidad Extendida del Productor (REP)	52
5.2.2 Financiamiento para Investigación y Desarrollo	53
5.3 Ley 21.368: Ley de Plásticos y Productos de un Solo Uso.	54
5.4 Riesgos biológicos en la interacción con material vivo	55
5.5 Ley 20.417: Ley que crea el Ministerio del Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente.	56
5.6 Decreto Supremo 148/2003: Reglamento para la Gestión de Residuos Peligrosos.	57
5.7 Decreto Supremo 189/2005: Reglamento para la Gestión de Residuos Sólidos Municipales.	58
5.8 Decreto Supremo 40/2012: Reglamento para la Gestión de Residuos Líquidos Industriales.	59
5.9 Experimentación con organismos vivos	60
CAPÍTULO 6: CLASIFICACIÓN DE PROCESOS Y BALANCE DE MASA	62
6.1 Definición de proceso	62
6.2 Tipos de procesos según continuidad	64
6.3 Configuración de flujos	65
6.4 Consideraciones importantes para el desarrollo de la metodología	66
6.5 Criterios para seleccionar el tipo de proceso según flujo	68
6.6 Balance de masa	71
CAPÍTULO 7: METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN PROCESO DE REDUCCIÓN DE EPS UTILIZANDO LARVAS DE ZOPHOBAS MORIO Y TENEBRIO MOLITOR.	72
7.1 Cumplimiento del marco legal	73
7.2 Consideración de datos e información de laboratorio (etapa previa)	73
7.3 Selección del número de etapas y diseño del proceso	75
7.4 Número de recipientes para cada etapa	76
7.5 Asignación de especies para cada etapa del proceso	77
7.6 Selección del tiempo de simulación	78
7.7 Selección del tipo de proceso	79
7.8 Selección del tipo de flujo para la biodegradación de EPS	80

7.9 Balances de masa	81
7.10 Cálculo de huella de carbono	83
7.12 Resumen de la metodología	83
CAPÍTULO 8: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	85
8.1 Selección del tipo de proceso	85
8.2 Selección del tipo de flujo	85
8.3 Balances de masa y evaluación de la huella de carbono	86
8.3.1 Balance de masa de RBD	87
8.3.2 Balance de masa de EPS	89
8.4 Huella de carbono	90
8.4 Discusiones	92
CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
REFERENCIAS	96

RESUMEN

La acumulación de residuos plásticos, especialmente el poliestireno expandido (EPS), presenta una grave amenaza para el medio ambiente ([Adita et al., 2024](#)). Ante este escenario, esta investigación propone una solución innovadora basada en la biodegradación del EPS utilizando larvas de insectos como el *Tenebrio molitor* y *Zophobas*

morio basándose en los estudios de [Albarracín & Clavijo, 2021](#); [Daviran, 2017](#); [Gómez y Sáiz, 2013](#); [Wang, Y., & Shelomi, M., 2015](#) y [Yang et al. 2020b, 2015a, 2015b](#) los cuales confirman que bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, estas larvas de insectos pueden degradar el EPS, ofreciendo una alternativa sostenible a los métodos tradicionales de gestión de residuos plásticos. A través de esta metodología para el diseño espera demostrar que la biodegradación del EPS mediante larvas es una tecnología viable, eficiente y sostenible, contribuyendo a la investigación ambiental abriendo nuevas perspectivas para el desarrollo de tecnologías de biorremediación.

Palabras clave: Biodegradación; Diseño de proceso; Poliestireno; *Tenebrio molitor*; *Zophobas morio*.

ABSTRACT

The accumulation of plastic waste, particularly expanded polystyrene (EPS), is a significant threat to the environment ([Adita et al., 2024](#)). In response to this challenge, this research proposes an innovative solution based on the biodegradation of EPS using insect larvae such as *Tenebrio molitor* and *Zophobas morio*, building upon previous studies by [Albarracín & Clavijo, 2021](#); [Daviran, 2017](#); [Gómez y Sáiz, 2013](#); [Wang, Y., & Shelomi, M., 2015](#) and [Yang et al. 2020b, 2015a, 2015b](#), which confirm that under controlled temperature and humidity conditions, these insect larvae can degrade EPS, offering a sustainable alternative to traditional plastic waste management methods. Through this methodological approach, we aim to demonstrate that the biodegradation of EPS by larvae is a viable, efficient, and sustainable technology, contributing to environmental research and opening new avenues for the development of bioremediation technologies.

Keywords: Biodegradation; Design process; Polystyrene; *Tenebrio molitor*; *Zophobas morio*.

INTRODUCCIÓN

La problemática ambiental asociada a los residuos sólidos constituye un desafío global de creciente relevancia. El incremento exponencial en la generación de residuos, impulsado por el crecimiento demográfico y los patrones de consumo insostenibles, ha sobrepasado la capacidad de los ecosistemas para absorberlos ([Hoornweg & Bhada-Tata, 2012](#)). Esta situación ha desencadenado una serie de impactos negativos en el medio ambiente, como

la contaminación de suelos y aguas, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático (UNEP, 2019). Ante este panorama, es imperativo adoptar estrategias integrales que promuevan la reducción, la reutilización y el reciclaje de residuos, así como el desarrollo de tecnologías innovadoras para su tratamiento y valorización (Geyer, Jambeck, & Law, 2017). La implementación de políticas públicas sólidas y la participación activa de la sociedad son fundamentales para garantizar una gestión sostenible de los residuos sólidos a largo plazo.

s fundamental promover la conciencia y la educación ambiental en torno a la gestión adecuada de los residuos sólidos, involucrando a la comunidad en la búsqueda de soluciones sostenibles. La acción colectiva y el compromiso con la sostenibilidad son pilares fundamentales para garantizar un futuro más limpio y saludable. Según Gallardo (2021), Secretario Regional Ministerial del Medio Ambiente, *"La última gran meta establecida en la Hoja de Ruta es que al 2040 se hayan eliminado el 90% de los vertederos ilegales del país, y que al año 2030 esta reducción ya haya llegado al 50%. Sin duda que cumplir este plan maestro tendrá un impacto directo en la calidad de vida de los chilenos, ya que si somos capaces de hacer de Chile un País Circular, la ciudadanía tendrá opciones de más y mejores trabajos, nuevas oportunidades de emprendimiento y barrios más limpios"*. La consecución de estos objetivos implicaría una mejora significativa en la calidad de vida de los chilenos y posicionaría a Chile como un referente en la gestión sostenible de residuos a nivel regional.

La Conferencia de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible de 1992 sentó las bases para la Agenda XXI, un plan de acción integral que busca abordar los desafíos ambientales y promover un desarrollo sostenible. En este contexto, la Agenda XXI recomienda la implementación de estrategias para minimizar la generación de residuos sólidos, fomentar el reciclaje, la reutilización y el tratamiento adecuado de los mismos, así como aumentar la cobertura de recolección.

En este sentido, la participación de insectos en la degradación de residuos plásticos emerge como una solución innovadora y efectiva. Especies como *Tenebrio molitor* y *Zophobas morio* han demostrado ser capaces de degradar residuos plásticos de manera eficiente, reduciendo significativamente la cantidad de residuos que llegan a los vertederos y minimizando los impactos negativos en el medio ambiente.

La degradación de residuos plásticos mediante insectos ofrece múltiples beneficios, incluyendo la reducción de la contaminación ambiental, la conservación de recursos naturales y la generación de oportunidades para la creación de empleos y la promoción de la economía circular. Además, esta tecnología sostenible puede ser implementada en diversas escalas, desde la gestión de residuos en comunidades rurales hasta la implementación en industrias y ciudades.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología integral y sostenible para el diseño de procesos innovadores que utilicen larvas de *Tenebrio molitor* y *Zophobas morio* para reducir el poliestireno expandido de manera eficiente y respetuosa con el medio ambiente. Esta metodología se centrará en optimizar la producción de larvas y minimizar los impactos ambientales asociados con el proceso, asegurando así la sostenibilidad y la viabilidad a largo plazo del mismo. Para lograr esto, se establecerán criterios claros y rigurosos para la selección de materias primas, el diseño de los procesos de cultivo de larvas y la evaluación de la eficiencia de la biodegradación del poliestireno. La metodología propuesta se basará en un enfoque integral que considere los aspectos técnicos, ambientales y socioeconómicos del proceso, permitiendo identificar oportunidades para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad del proceso, y minimizar los impactos negativos en el medio ambiente y la sociedad.

El diseño, implementación y evaluación del proceso de degradación de residuos plásticos son aspectos fundamentales para garantizar la eficiencia y efectividad en la minimización de los impactos negativos en el medio ambiente. El proceso de degradación implica una planificación y ejecución meticulosa para asegurar que las larvas de *Tenebrio molitor* y *Zophobas morio* degraden efectivamente el poliestireno expandido.

La implementación del proceso de degradación es una fase crítica, donde se ejecutan las estrategias y métodos diseñados para lograr la degradación efectiva. Durante esta etapa, es esencial diseñar el proceso de tal manera que se permita monitorear su eficacia, para asegurarse de que se logren los objetivos de minimización de los impactos negativos en el medio ambiente.

La evaluación del proceso de degradación es la fase final, donde se analizan los resultados obtenidos y se realizan ajustes y mejoras continuas para asegurarse de que se está logrando la máxima eficiencia y minimizando los impactos negativos en el medio ambiente. Esta

evaluación permite identificar áreas de mejora y optimizar el proceso de degradación para lograr resultados aún más efectivos.

En este sentido, el diseño, implementación y evaluación del proceso de degradación son etapas interconectadas que permiten lograr la degradación efectiva de los residuos plásticos y minimizar los impactos negativos en el medio ambiente. La planificación y ejecución cuidadosa de estas etapas garantiza el logro de los objetivos de producción y contribuye a la sostenibilidad ambiental.

Además, la evaluación continua y la optimización del proceso de degradación permiten identificar oportunidades de mejora y ajustar el proceso para lograr una mayor eficiencia y efectividad en la degradación de residuos plásticos. Esto, a su vez, contribuye a reducir la cantidad de residuos plásticos que llegan a los vertederos y minimizar los impactos negativos en el medio ambiente.

OBJETIVOS

A continuación, se presentan los objetivos de este trabajo, que se centran en desarrollar un método innovador y sostenible para descomponer el poliestireno utilizando larvas de *Zophobas morio* y *Tenebrio molitor*.

Objetivo General

Desarrollar una metodología para el diseño de un proceso de biodegradación de poliestireno expandido (EPS) utilizando larvas de *Zophobas morio* y *Tenebrio molitor*, optimizando las condiciones de operación y diseñando un modelo de proceso sostenible que permita su implementación a gran escala.

Objetivos específicos

Los siguientes objetivos específicos establecen aquellas acciones o actividades para lograr el objetivo general.

Objetivo 1: Optimización del Proceso de Biodegradación

Experimentación: Realizar un diseño experimental riguroso, variando parámetros como temperatura, humedad y población de larvas para determinar las condiciones óptimas de biodegradación.

Análisis de Datos: Emplear herramientas estadísticas para analizar los resultados experimentales y establecer correlaciones entre las variables.

Revisión Bibliográfica: Consolidar el conocimiento existente sobre la biodegradación enzimática de polímeros y la ecofisiología de las larvas utilizadas.

Objetivo 2: Diseño de un Modelo de Proceso Sostenible

Análisis de Ciclo de Vida: Realizar un análisis detallado del ciclo de vida del proceso, evaluando el consumo de energía, agua y otros recursos, así como la generación de residuos y emisiones.

Optimización de Recursos: Identificar y seleccionar materiales y tecnologías que minimicen el impacto ambiental del proceso.

Evaluación Económica: Realizar un análisis económico para determinar la viabilidad financiera del proceso a escala industrial.

Objetivo 3: Implementación a Gran Escala

Escalado: Evaluar la escalabilidad del proceso y los desafíos asociados a su implementación a nivel industrial.

Análisis de Mercado: Identificar potenciales mercados y clientes para los productos obtenidos del proceso de biodegradación.

Plan de Negocio: Elaborar un plan de negocio que abarque análisis técnico, económico y de mercado.

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL OBJETO DE ESTUDIO

En este capítulo, se presenta la problemática central que se abordará en el presente estudio, la cual se ha identificado como un tema de gran relevancia y actualidad.

1.1. Planteamiento del problema

La gestión inadecuada de los residuos plásticos ha generado una crisis ambiental de proporciones globales, con impactos particularmente severos en los ecosistemas acuáticos. La proliferación de plásticos en mares y océanos ha desencadenado una serie de problemas ambientales, entre los que destacan la contaminación de hábitats, la ingestión por parte de fauna marina y la fragmentación en microplásticos, que se acumulan en la cadena trófica (Jambeck et al., 2015). Esta situación representa una amenaza significativa para la biodiversidad marina, poniendo en peligro la supervivencia de numerosas especies y alterando los ecosistemas marinos de manera irreversible (Cózar et al., 2014).

Esto subraya la necesidad urgente de abordar la problemática de los residuos plásticos en los océanos y de implementar soluciones efectivas para reducir la cantidad de plásticos que llegan a los ecosistemas acuáticos. La Figura 1 muestra el efecto de la contaminación del plástico.



Figura 1. La imagen muestra una playa repleta de residuos plásticos, destacando la magnitud del problema a nivel global.

Fuente: Adaptado de Marine pollution caused by plastic waste, de Cózar et al., 2014

La contaminación ambiental, definida en la Ley 19.300 (1993) como la presencia de sustancias en concentraciones perjudiciales para el ambiente y la salud, representa una grave amenaza para los ecosistemas y la población. Un aspecto crítico de la contaminación ambiental es el cambio climático, causado principalmente por el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Estos gases, como el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), actúan atrapando el calor del sol y provocando un calentamiento global acelerado (IPCC, 2021). El aumento de la temperatura global tiene consecuencias devastadoras para los ecosistemas y las

comunidades humanas, incluyendo el aumento del nivel del mar, eventos climáticos extremos y la pérdida de biodiversidad.

La huella de carbono, definida como la medida total de las emisiones de GEI asociadas a una actividad, es una herramienta útil para cuantificar el impacto individual y colectivo en el cambio climático (WWF, 2020). Al comprender nuestra huella de carbono, podemos tomar medidas para reducirla y contribuir a mitigar los efectos del cambio climático.

La Figura 2 muestra una representación visual sencilla del efecto invernadero. Este fenómeno es esencial para mantener la temperatura de la Tierra en un rango habitable, pero el aumento excesivo de estos gases debido a las actividades humanas está provocando un calentamiento global acelerado, con consecuencias como el cambio climático.



Figura 2. Resumen del efecto invernadero.

Fuente: Voz de América, (9 de Noviembre de 2015)

1.2. Antecedentes del estudio

Las actividades humanas han dejado una huella profunda en el planeta, generando problemas ambientales como la contaminación y la pérdida de biodiversidad. Si bien el reciclaje de plásticos es una opción, su viabilidad se ve limitada por factores como la alta

demanda energética, el uso de sustancias tóxicas y la baja rentabilidad económica en muchos casos (Geyer, Jambeck, & Law, 2017).

Ante esta situación, la biodegradación de plásticos mediante organismos como las larvas de la harina emerge como una alternativa prometedora. Este proceso aprovecha la capacidad de ciertos microorganismos, presentes en el intestino de estos insectos, para descomponer polímeros como el poliestireno expandido (EPS) (Albarracín & Clavijo, 2021; Daviran, 2017; Gómez y Sáiz, 2013; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015; Yang et al., 2020b, 2015a, 2015b). Sin embargo, la optimización de este proceso requiere considerar variables como las características del plástico (duración, uso, densidad), las limitaciones de los organismos degradadores y las condiciones ambientales. Factores como el canibalismo y los restos de las mudas de piel pueden influir en la eficiencia de la biodegradación y deben ser cuidadosamente monitoreados.

1.3. Justificación del problema

El modelo económico actual y la industrialización han generado cambios significativos en el comportamiento de la población, lo que se ha traducido en un aumento desproporcionado de residuos, especialmente plásticos. Aunque el plástico es un producto ampliamente utilizado y fundamental en la vida moderna, su vida útil es corta, lo que genera una producción anual desproporcionada. Además, el plástico puede tardar entre 100 y 1000 años en degradarse en el ambiente, causando daños irreversibles en los ecosistemas.

Ante esta situación, es crucial mitigar el impacto que genera el plástico, lo que hace indispensable buscar estrategias para aumentar su vida útil o reciclarlo de la mejor manera posible.

Dentro de las alternativas para mitigar plástico en general y EPS en particular, se encuentran el reciclaje y la valorización. Una forma de la primera de ellas es aquella en la cual, mediante un proceso de prensado y fusión en caliente, disminuye el volumen de las briquetas de EPS hasta en un 90%. Esta reducción de tamaño resuelve un gran desafío en el reciclaje de este material, que es la dificultad de transporte. Además, las briquetas resultantes pueden ser procesadas aún más para obtener granulado plástico, abriendo un

abanico de posibilidades para la creación de nuevos productos valorizables ([GreenMax , 2024](#)). Un ejemplo de valorización es la producción de pintura en donde el EPS pasa a través de un proceso de extrusión y con la adición de compuestos químicos al granulado de EPS, se permite descomponer el EPS en una resina base. Con esta resina, luego de ser mezclada con talco, se obtiene un producto de pintura con propiedades mejoradas, contribuyendo a la economía circular y a la reducción de la huella de carbono ([EcoClean, 2024](#)). Ambas referencias mostradas son ejemplos de alternativas para la mitigación de EPS en Chile.

Una alternativa innovadora, viable, biológica-natural y que no tiene los efectos dañinos de la anterior es el diseño de procesos de reducción de EPS utilizando larvas de *Zophobas morio* y *Tenebrio molitor*. Estas especies tienen una alta capacidad reproductiva y su crianza no es considerada compleja, lo que las hace ideales para este propósito.

La importancia de este enfoque radica en evaluar aspectos fundamentales como el ciclo de vida, la supervivencia y la variación en biomasa de las larvas sometidas a una dieta a base de EPS y otros elementos. Mediante la realización de un diseño experimental, se puede verificar si es posible implementar este sistema de biodegradación a partir de la capacidad que poseen las larvas para degradar este residuo.

Este enfoque no solo puede contribuir a reducir la cantidad de plástico en el ambiente, sino que también puede generar beneficios económicos y ambientales a largo plazo. Es fundamental continuar investigando y desarrollando estrategias innovadoras para abordar el problema del plástico y proteger el medio ambiente.

1.4. Importancia de la investigación

La economía circular y la reducción de residuos están estrechamente relacionadas. La economía circular promueve un modelo económico sostenible que minimiza desechos y optimiza recursos mediante prácticas como reutilización, reciclaje y diseño sostenible, contribuyendo a la conservación de recursos naturales, reducción de contaminación y promoción de la biodiversidad, y fomentando la colaboración y el crecimiento económico sostenible para un futuro más sostenible y circular.

La implementación de la economía circular es una estrategia integral para abordar la contaminación ambiental, promoviendo un cambio fundamental en la forma en que producimos y consumimos. Según el informe del Banco Mundial "What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management", el modelo de economía lineal implica un uso intensivo de recursos naturales, generación de grandes cantidades de residuos y emisiones de gases de efecto invernadero (What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050, Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank, 2018.). Según Pearce y Turner (1990), la economía circular se basa en un enfoque sistémico que busca cerrar el ciclo de vida de los productos, reduciendo la extracción de recursos naturales y minimizando la generación de residuos. En la Figura 3 muestra la como la economía lineal es un modelo obsoleto que agota los recursos y genera una gran cantidad de residuos, mientras que la economía circular es una alternativa más sostenible que busca minimizar el impacto ambiental y maximizar el valor de los recursos.

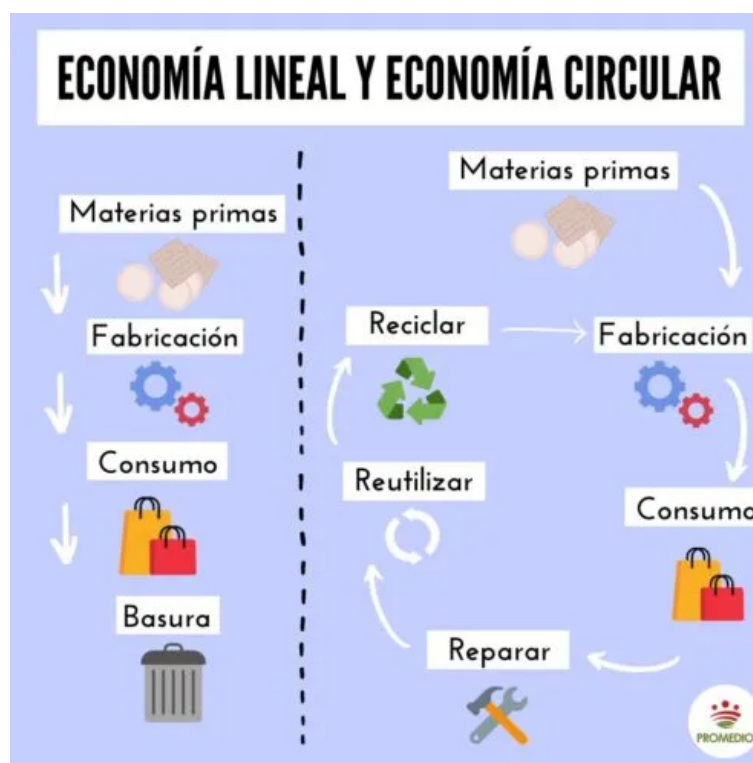


Figura 3. Comparación resumida entre Economía lineal y Economía circular.

*Fuente: Adaptado de ECONOMIA CIRCULAR, por Teachers for future Spain,
(<https://teachersforfuturespain.org/economia-circular/>)*

Este enfoque propone un cambio radical, pasando de un modelo lineal de "extraer, fabricar, desechar" a un sistema circular donde los materiales se recuperan y reutilizan

constantemente. La reparación, el reciclaje y la regeneración son claves para lograr esto, creando nuevos productos a partir de los residuos y cerrando así el ciclo económico.

La reparación extiende la vida útil de los productos, reduciendo la necesidad de producir nuevos bienes y minimizando la generación de residuos. El reciclaje convierte los residuos en materiales secundarios, reduciendo la extracción de recursos naturales y disminuyendo la contaminación ambiental. La regeneración restaura los ecosistemas naturales y promueve la biodiversidad, mejorando la salud del planeta.

La economía circular requiere un cambio en la mentalidad y en las prácticas de producción y consumo, pero ofrece una oportunidad única para crear un futuro más sostenible y resiliente ([Ellen MacArthur Foundation, 2013](#)). Al implementarla, se pueden lograr numerosos beneficios, como la reducción de la contaminación ambiental, la conservación de recursos naturales, la minimización de residuos, la creación de empleos verdes y el fomento de la innovación y la competitividad.

Considerando lo anterior, es crucial desarrollar un enfoque innovador para abordar las medidas de mitigación, especialmente con la inclusión de elementos entomológicos poco comunes. La promulgación de la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) agrega un nuevo desafío, ya que obliga a los fabricantes a recuperar un porcentaje de residuos de seis tipos de productos prioritarios. Estos productos, seleccionados por su consumo masivo, volumen físico y potencial peligro para la salud humana y el medio ambiente, incluyen neumáticos, aceites lubricantes, baterías, aparatos electrónicos, envases y embalajes, como el EPS.

Es esencial generar estrategias efectivas para abordar la gestión de estos residuos, considerando la complejidad y el impacto ambiental de cada uno de ellos. La implementación de la Ley REP ofrece una oportunidad para fomentar la innovación y la responsabilidad en la gestión de residuos, y es crucial que los fabricantes y la sociedad en general trabajen juntos para encontrar soluciones sostenibles y efectivas.

Es imperativo diseñar y aplicar soluciones innovadoras para reducir, reciclar y valorizar residuos, especialmente aquellos de lenta biodegradabilidad como el EPS. Es importante encontrar una alternativa rentable que fomente el reciclaje de estos envases, ya que los altos costos de procesamiento los llevan a terminar en vertederos, lo que no se alinea con los principios de Pearce y Turner. Este proyecto se alinea con las conclusiones del Comité de Innovación en Economía Circular, que identifica como desafío prioritario la creación de

bienes más sostenibles a través del desarrollo y aplicación de procesos que aceleren la degradación de materiales plásticos (Cerdá E. & Khalilova A., 2016).

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO DEL ESTUDIO

Este capítulo se divide en dos secciones complementarias. La primera de ellas se enfoca en la caracterización de residuos, con especial atención en los Residuos Sólidos Domiciliarios y Asimilables (RSDyA) y los polímeros, particularmente el poliestireno expandido (EPS). Se analiza su ciclo de vida, propiedades e impacto ambiental en términos de huella hídrica y de carbono. Además, se aborda la problemática de los microplásticos, sus fuentes de generación y los riesgos asociados. La segunda sección se centra en las alternativas de gestión de residuos plásticos a través de la biodegradación. Se exploran los factores, estrategias y adaptación de especies capaces de biodegradar EPS, como los llamados “gusanos de la harina”. Esta sección ofrece soluciones innovadoras para abordar el desafío de los residuos plásticos y promover una gestión más sostenible.

2.1 Caracterización de residuos

2.1.1 Residuos Sólidos Domiciliarios y Asimilables (RSDyA)

- Definición y magnitud del problema

Los Residuos Sólidos Domiciliarios y Asimilables (RSDyA) son un tipo de residuo que engloba una amplia variedad de desechos generados en diferentes ámbitos, como viviendas, establecimientos comerciales, instituciones educativas, hospitales y otros espacios similares. Estos residuos son el resultado de las actividades cotidianas de las

personas y pueden incluir desechos orgánicos, como restos de alimentos y jardinería, así como materiales inorgánicos, como plásticos, papel, cartón, vidrio y metales. La composición de los RSDyA varía según el estilo de vida de la población, los hábitos de consumo y las prácticas de manejo de residuos, pero generalmente contienen una mezcla de materiales reciclables, reutilizables y no reciclables, lo que representa un desafío importante para las autoridades y la sociedad. Una gestión adecuada de los RSDyA es fundamental para mantener la limpieza y la salubridad en las ciudades y comunidades, proteger el medio ambiente y promover el desarrollo sostenible. Por ello, es crucial implementar estrategias efectivas para reducir, reutilizar y reciclar estos residuos, y fomentar una cultura de responsabilidad y conciencia ambiental entre la población. En Chile, estos residuos constituyen una fracción significativa de los residuos sólidos municipales, representando un 58% del total, según la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos Chile 2040. En la región de Valparaíso, la magnitud del problema es particularmente notable, con una generación anual de 859.000 toneladas de RSDyA, según datos del informe [SGS-SIGA \(2018\)](#). Esta cifra subraya la necesidad de abordar de manera efectiva la gestión de estos residuos para minimizar su impacto ambiental y promover una mayor sostenibilidad en el manejo de residuos en la región.

- Impacto ambiental

El impacto ambiental de los Residuos Sólidos Domiciliarios y Asimilables (RSDyA) es significativo, especialmente en el caso de los residuos orgánicos, que generan olores desagradables, sirven como vectores de enfermedades y emiten gases de efecto invernadero (GEI) cuando no se tratan adecuadamente. La descomposición anaeróbica de estos residuos produce metano, un gas con un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el dióxido de carbono, según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático ([IPCC, 2021](#)). La pandemia de COVID-19 ha exacerbado este problema, incrementando la generación de RSDyA, principalmente en embalajes de cartón, nylon y polietileno, debido al auge del comercio electrónico ([Van Fan, 2020](#)). Aunque existen leyes que regulan el uso de estos plásticos, como la Ley 20.920 y la Ley 21.368, que serán examinadas en profundidad en otro capítulo, la realidad es que la reincidencia en su utilización por parte de comercios pequeños y no regulados sigue siendo un problema persistente. Esto pone de manifiesto la necesidad imperante de implementar estrategias más efectivas y eficaces para reducir la generación de estos residuos y fomentar prácticas más sostenibles en la sociedad. La falta de cumplimiento de estas leyes por parte de algunos comercios pequeños y

no regulados puede deberse a una falta de conciencia sobre la importancia de la gestión adecuada de residuos, o a la ausencia de incentivos o sanciones efectivas para promover el cambio. Por lo tanto, es crucial desarrollar e implementar políticas y programas que aborden estas brechas y promuevan una cultura de sostenibilidad en todos los sectores de la sociedad.

2.1.2 Polímeros

- Definición y origen

Los polímeros son macromoléculas complejas formadas por la unión de múltiples unidades más pequeñas llamadas monómeros, que se enlazan entre sí a través de procesos químicos. Estos monómeros se unen a través de enlaces químicos, creando estructuras complejas y variadas. La mayoría de los polímeros se derivan del petróleo, una fuente no renovable, mediante un proceso de polimerización que implica la transformación de monómeros en cadenas largas y complejas. Sin embargo, también existen polímeros naturales que se encuentran en la naturaleza, como el algodón, la seda, la celulosa y las proteínas.

La producción de polímeros ha alcanzado niveles sin precedentes, con una cifra récord de 390.7 millones de toneladas en 2021, según datos de [Plastics Europe \(2022\)](#). Este volumen masivo de producción refleja la omnipresencia de los polímeros en la sociedad actual, donde se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, desde envases y embalajes hasta textiles, electrónicos y materiales de construcción. La generalización del uso de polímeros en nuestra vida diaria subraya la importancia de comprender su origen, propiedades e impacto ambiental. La industria de los polímeros ha experimentado un crecimiento exponencial desde principios del siglo XX, impulsado por el desarrollo de plásticos como el poliestireno y el polietileno. Estos materiales sintéticos han revolucionado diversos sectores, desde la fabricación y el embalaje hasta la construcción y la electrónica, convirtiéndose en componentes esenciales de nuestra vida cotidiana ([PlasticsEurope, 2022](#)).

- Impacto ambiental

El impacto ambiental de los polímeros es un tema de creciente preocupación debido a su amplia utilización en diversas aplicaciones y su persistencia en el medio ambiente. La producción y uso de polímeros están estrechamente vinculados al consumo de recursos no renovables, como el petróleo y el gas natural, lo que contribuye al agotamiento de estos recursos y al cambio climático. Además, la fabricación de polímeros implica procesos que

emiten gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono y el metano, lo que acentúa el problema del calentamiento global.

La degradación de los polímeros en el medio ambiente es un proceso lento que puede tardar cientos de años, lo que significa que estos materiales pueden persistir en el entorno durante períodos prolongados, causando daños a la fauna y flora. La contaminación por plásticos es otro aspecto preocupante del impacto ambiental de los polímeros. Los plásticos se descomponen en microplásticos que pueden ser ingeridos por animales marinos y entrar en la cadena alimentaria, lo que representa un riesgo para la salud humana y la biodiversidad.

La acumulación de residuos plásticos en vertederos y océanos es un problema creciente que requiere soluciones urgentes. Se estima que para el año 2040 habrá entre 23 a 37 millones de toneladas de plásticos en el océano ([PNUMA, 2023](#)), lo que representa una amenaza significativa para la biodiversidad marina. Los productos no biodegradables, como los plásticos que pueden tardar cientos de años en descomponerse, causan un perjuicio significativo al medio ambiente durante todo el proceso de degradación. Aunque algunos de estos materiales son reciclables, este proceso no es suficiente para mitigar el problema, ya que requiere de la intervención humana ([Umaña Gallego, 2007](#)). Es fundamental adoptar medidas para reducir el uso de polímeros, promover el reciclaje y desarrollar materiales sostenibles que minimicen el daño ambiental.

2.1.3 Huella Hídrica y Huella de Carbono

La producción de poliestireno, un plástico versátil y ampliamente utilizado, genera preocupación por su impacto ambiental. Este análisis se centra en evaluar las repercusiones ambientales del poliestireno en términos de su huella hídrica y huella de carbono durante su proceso de producción, con el objetivo de comprender mejor el efecto de la fabricación de este material en el consumo de agua y la emisión de gases de efecto invernadero.

Huella hídrica

La producción de poliestireno conlleva un consumo significativo de agua en diversas etapas de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la producción del polímero ([Allen, D., Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. 2013](#)). Aunque el poliestireno puede considerarse como un material con una huella hídrica moderada en comparación con otros plásticos, la contaminación del agua por aditivos y compuestos químicos utilizados

en su producción representa un riesgo ambiental considerable (UNEP, 2019). Es imperativo adoptar estrategias para minimizar la huella hídrica del poliestireno, promoviendo prácticas sostenibles y tecnologías limpias que reduzcan el consumo de agua y minimicen la contaminación acuática.

Huella de carbono

El poliestireno, al ser un producto derivado del petróleo, presenta una huella de carbono considerable debido a las emisiones de gases de efecto invernadero generadas durante su producción y procesamiento (PlasticsEurope, 2022). La producción de plásticos, en general, contribuye significativamente a las emisiones globales de CO₂, lo que subraya la urgencia de desarrollar alternativas más sostenibles (UNEP, 2019). La dependencia de los combustibles fósiles en la producción de poliestireno y la energía requerida para su fabricación son factores clave que incrementan su huella de carbono.

Es fundamental adoptar un enfoque holístico para abordar tanto la huella hídrica como la de carbono del poliestireno. Si bien la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero es una prioridad global, es igualmente importante considerar los impactos locales del consumo de agua, especialmente en regiones con escasez hídrica (Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y., 2011). Al evaluar las opciones para reducir la huella ambiental del poliestireno, es esencial considerar las características específicas de cada región y las prioridades ambientales locales.

2.1.4 Microplásticos

Los microplásticos son partículas de plástico extremadamente pequeñas, con un tamaño inferior a 5 mm, que se dividen en dos categorías: primarios, que son fabricados intencionalmente de ese tamaño, y secundarios, que se forman a partir de la degradación de materiales plásticos más grandes. Estas partículas invaden todos los ámbitos de nuestro entorno, incluyendo el agua, el suelo, los organismos vivos y, alarmantemente, incluso la cadena alimentaria humana. La presencia de microplásticos en estos contextos genera un riesgo significativo para la salud humana y el equilibrio del ecosistema y la magnitud de este problema requiere una atención inmediata y acciones efectivas para mitigar la contaminación por microplásticos y proteger nuestro medio ambiente (PNUMA, 2023).

2.1.5 Poliestireno expandido (EPS)

El poliestireno expandido (EPS) es un material plástico liviano, aislante y resistente a impactos, ampliamente utilizado en la industria del embalaje y empaques debido a su bajo costo y versatilidad. Sin embargo, su producción anual mundial de 35 millones de toneladas, que representa el 9.5% de los polímeros sintéticos, genera preocupaciones ambientales y de salud (Plastics Europe, 2022). La composición del EPS, que consta de un 98% de aire y un 2% de materia prima, hace que su transporte y almacenamiento sean complicados. Además, su degradación es un proceso complejo que libera sustancias químicas cancerígenas, como el estireno y el benceno, lo que representa un riesgo significativo para la salud humana (Ramo Carpio & De Maria Ruiz, 1988). La Figura 4 es una fotografía del EPS mostrando su morfología.



Figura 4. Trozo de plumavit o poliestireno expandido (EPS, en el presente estudio)

*Fuente: Adaptado de fragmento de poliestireno expandido, por Javier y Cristian, 2009,
(<https://villalbaestano.wordpress.com/el-poliestireno/>)*

A escala industrial, la producción de poliestireno comienza con el calentamiento del etilbenceno en presencia de un catalizador, lo que desencadena una reacción química que transforma esta sustancia en estireno.

Para convertir el estireno en poliestireno, se realiza mediante una polimerización vinílica por radicales libres, en donde se añade una pequeña cantidad de un iniciador, como un peróxido, que se descompone y forma radicales libres (Figura 5). Estos radicales altamente reactivos se unen a una molécula de estireno, creando un nuevo radical más grande. Este nuevo radical, a su vez, se une a otra molécula de estireno y así sucesivamente, formando

una cadena en crecimiento. Este proceso continúa hasta que dos radicales se encuentran y se combinan, poniendo fin a la cadena (Figura 6).



Figura 5. Polimerización vinílica por radicales libres

*Fuente: Adaptado de Poliestireno, por Mariano, 2011,
(<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/poliestireno.html>)*

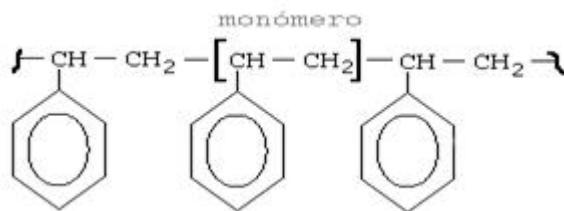


Figura 6. Cadena de monómeros

*Fuente: Adaptado de Poliestireno, por Mariano, 2011,
(<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/poliestireno.html>)*

La clasificación del estireno como una sustancia probablemente cancerígena para los humanos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2016 destaca la gravedad de los riesgos para la salud asociados con la exposición a este químico. El estireno, un componente clave en la producción de EPS, ha sido vinculado a un aumento en el riesgo de desarrollar cáncer, particularmente leucemia y linfoma. Además, la exposición al estireno también puede causar efectos adversos en el sistema nervioso, incluyendo dolores de cabeza, mareos y problemas de concentración.

En vista de estos riesgos, es imperativo abordar los impactos ambientales y de salud asociados con el EPS de manera integral. Esto implica no sólo reducir su uso, sino también

desarrollar y promover alternativas sostenibles que puedan reemplazar al EPS en diversas aplicaciones. Algunas opciones incluyen materiales biodegradables, como el poliestireno biodegradable, o materiales reciclados, como el papel y el cartón.

Además, es crucial implementar medidas para minimizar la exposición al estireno y otros químicos nocivos durante la producción, manipulación y disposición del EPS. Esto puede incluir la mejora de las prácticas de seguridad laboral, la implementación de tecnologías de control de emisiones y la promoción de la recolección y el reuso del EPS.

2.2 Reducción de la contaminación plástica mediante biodegradación

La biodegradación es un proceso natural esencial para mitigar la contaminación por plásticos, en el cual microorganismos como bacterias y hongos descomponen materiales en componentes más simples. A través de este proceso, los plásticos biodegradables pueden ser transformados en biogás y compuestos orgánicos, reduciendo significativamente su impacto ambiental. Los microorganismos utilizan los plásticos como fuente de alimento y energía, convirtiéndolos en compuestos más sencillos como dióxido de carbono, agua y biomasa.

Sin embargo, es importante destacar que no todos los plásticos son biodegradables y que el proceso de biodegradación puede ser lento y dependiente de condiciones específicas, como la presencia de oxígeno, temperatura y humedad ([Albarracín & Clavijo, 2021](#); [Arellano & Velásquez, 2017](#); [Wang, Y., & Shelomi, M., 2015](#)). Por lo tanto, es crucial desarrollar tecnologías y materiales que faciliten la biodegradación, como plásticos biodegradables y compostables, y promover prácticas sostenibles para reducir la contaminación plástica.

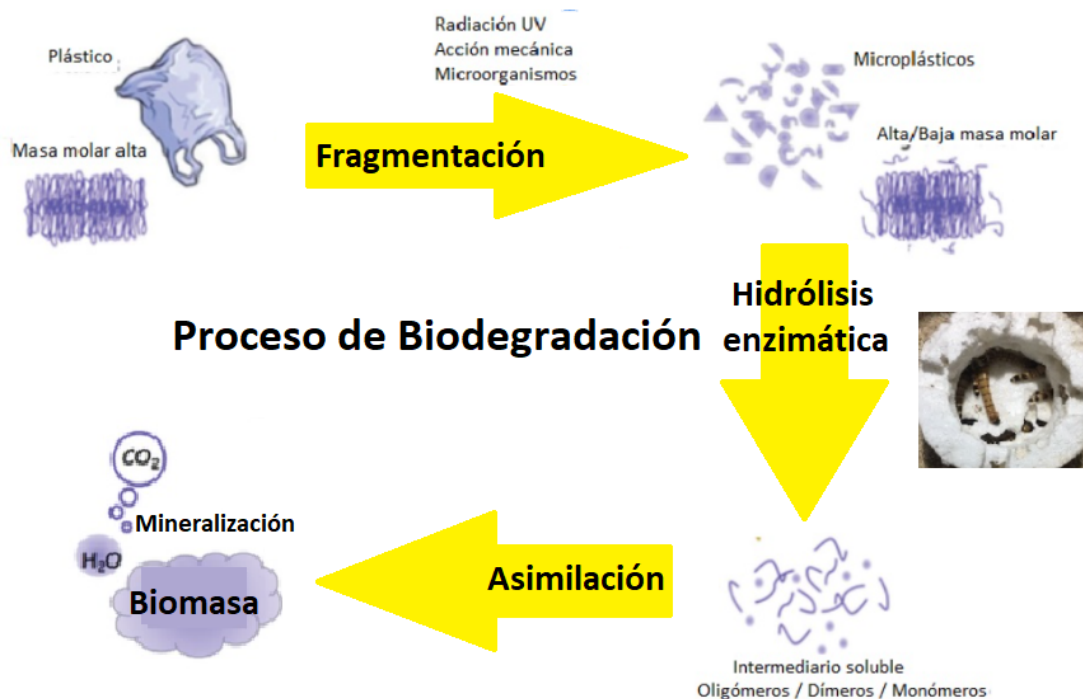


Figura 7. Proceso de biodegradación del plástico.

Fuente: (Wang et al., 2021)

En este sentido, un informe de [BIOPOLCOM Chile en 2019](#) destaca la importancia de la biodegradación como una estrategia clave para abordar la contaminación plástica en el país. El informe recomienda la implementación de sistemas de reciclaje y compostaje eficientes, la educación y concienciación sobre la importancia de la biodegradación, y el fomento de la investigación y desarrollo de nuevos materiales biodegradables. El objetivo es reducir la cantidad de plásticos que terminan en la naturaleza y minimizar su impacto ambiental, logrando así un futuro más sostenible.

Como se ilustra en la [Figura 7](#), el proceso de biodegradación del plástico comprende una serie de etapas interconectadas que se suceden de manera secuencial, dando lugar a la transformación progresiva del material plástico en compuestos más simples y menos nocivos para el medio ambiente. A continuación, se presentan las principales etapas:

1. Fragmentación: El plástico se descompone en pedazos más pequeños debido a factores ambientales como la luz solar, el calor, la humedad y los microorganismos. Esto sucede porque la luz solar puede debilitar las moléculas del plástico, el calor puede hacer que se vuelvan más flexibles y propensas a romperse, la humedad puede hacer que se degraden y

los microorganismos pueden alimentarse de ellos y descomponerlos aún más. Todo esto contribuye a la fragmentación del plástico en pedazos más pequeños, lo que puede tener graves consecuencias para el medio ambiente y la salud humana.

2. Hidrólisis enzimática: Las enzimas que se encuentran en el interior de la larva actúan como catalizadores para descomponer las moléculas de plástico en compuestos más simples. Esto sucede porque las enzimas pueden romper los enlaces químicos entre las moléculas de plástico, lo que permite que se descompongan en fragmentos más pequeños. A medida que los microorganismos se alimentan de estos fragmentos, pueden convertirlos en dióxido de carbono, agua y otros compuestos inofensivos.

3. Asimilación: Cuando los microorganismos descomponen el plástico, liberan nutrientes esenciales como carbono, nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes son entonces absorbidos por los microorganismos y utilizados para su crecimiento y reproducción. De esta manera, los microorganismos no solo descomponen el plástico, sino que también se benefician de los nutrientes liberados, lo que les permite prosperar y seguir descomponiendo más plástico. Este ciclo de asimilación y descomposición es fundamental para la biodegradación eficiente del plástico y demuestra la importancia de los microorganismos en la restauración de la salud del medio ambiente.

4. Mineralización: La mineralización es el proceso final que cierra el ciclo de vida del plástico, convirtiendo los compuestos orgánicos simples en minerales inorgánicos, como carbonato de calcio, que pueden ser reutilizados por la naturaleza. Esto significa que los elementos químicos que componían el plástico, como el carbono, el oxígeno y el calcio, son liberados y pueden ser reincorporados a los ciclos biogeoquímicos naturales. De esta manera, la mineralización permite que los nutrientes sean reciclados y reutilizados por otros organismos, reduciendo la necesidad de extraer recursos naturales y minimizando el impacto ambiental del plástico. Además, la formación de minerales inorgánicos puede incluso contribuir a la formación de suelos y rocas, demostrando que, con la ayuda de los microorganismos, el plástico puede ser transformado en algo verdaderamente valioso para el medio ambiente.

Es importante destacar que la velocidad a la que se produce la biodegradación depende de varios factores, como el tipo de plástico, la temperatura, la humedad, la presencia de microorganismos y la disponibilidad de oxígeno. Algunos plásticos, como los polímeros biodegradables, pueden descomponerse en cuestión de años, mientras que otros, como los

plásticos convencionales, pueden tardar décadas o incluso siglos en descomponerse completamente. Es importante reconocer que la biodegradación del plástico es un proceso a largo plazo y que se requieren esfuerzos sostenidos para reducir la cantidad de plástico en el medio ambiente y promover prácticas más sostenibles.

La biodegradación emerge como una solución prometedora para abordar la creciente problemática de la contaminación por plásticos. Este proceso natural, facilitado por microorganismos como bacterias y hongos, descomponen los materiales orgánicos en compuestos más simples (Albarracín & Clavijo, 2021; Daviran, 2017; Gómez y Sáiz, 2013; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015; Yang et al 2020b, 2015a, 2015b) demostrando un gran potencial para mitigar el impacto ambiental del plástico. A través de la biodegradación, el peso molecular del plástico se reduce significativamente, transformando o mineralizando los contaminantes orgánicos en sustancias menos peligrosas y en menor cantidad (Yang et al., 2020b, 2015 a, 2015b). Este proceso no solo minimiza el riesgo de contaminación, sino que también permite que los materiales biodegradados reingresen a los ciclos bioquímicos, abriendo nuevas posibilidades para su reutilización en la producción de energía y la creación de sustancias valiosas como aminoácidos, tejidos y organismos, promoviendo así un enfoque más circular y sostenible en la gestión de residuos.

- **Factores que influyen en la biodegradación del plástico**

Citando los estudios de Albarracín & Clavijo, 2021 y Wang & Shelomi (2015); Algunos factores que influyen la biodegradación larvaria del EPS son: El tamaño y la edad de las larvas, así como las condiciones ambientales, influyen significativamente en su capacidad para biodegradar EPS, las larvas más pequeñas son más eficientes en el consumo de poliestireno, mientras que las larvas más grandes, al estar más cerca de su etapa de pupa, tienen un proceso de biodegradación más lento. En cuanto a la proporción de alimentos, las larvas no discriminan entre el poliestireno y otros alimentos, lo que indica su capacidad de metabolizar ambos. Sin embargo, la proporción de poliestireno y alimento puede influir en la tasa de biodegradación. La temperatura óptima para la biodegradación del poliestireno por parte de estas larvas se encuentra alrededor de 16°C. Temperaturas más altas, como 29°C, disminuyen la eficiencia del proceso (Albarracín & Clavijo, 2021; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

Por otro lado, el pH y la humedad también desempeñan un papel fundamental en la biodegradación del plástico. El pH puede afectar la disponibilidad de nutrientes y la actividad enzimática de los microorganismos, mientras que la humedad puede influir en la difusión de oxígeno y nutrientes hacia los microorganismos ([Gómez y Sáiz, 2013](#)).

- **Estrategias de biodegradación de plástico con organismos vivos**

La biodegradación de plástico con organismos vivos es una estrategia innovadora y sostenible que se centra en utilizar microorganismos como bacterias, hongos y levaduras para degradar el plástico, produciendo enzimas que rompen las moléculas de plástico en componentes más pequeños. Esta alternativa amigable con el medio ambiente es especialmente crucial para materiales resistentes a la degradación, como el EPS, que requieren estrategias eficientes para su descomposición.

El descubrimiento del potencial de los gusanos de harina (larvas de *Tenebrio molitor*) para degradar el EPS es un avance significativo en este campo, gracias a un simbionte microbiano intestinal que juega un papel fundamental en la degradación del polímero ingerido. Esto abre la posibilidad de explorar el potencial de otras especies de insectos de la familia Tenebrionidae para la biodegradación del plástico como lo plantea Park et al 2013 en donde se compara la taxonomía y el material genético (ADN) de otras especies del orden tenebrionidae ([Park et al., 2013](#)), ofreciendo nuevas perspectivas para abordar el problema del plástico en el medio ambiente.

La biodegradación de plástico con organismos vivos ofrece una solución sostenible y eficiente para reducir la cantidad de plástico en el medio ambiente. Además, este enfoque tiene el potencial de desarrollar nuevas tecnologías de biodegradación, lo que podría revolucionar la forma en que abordamos el problema del plástico en el medio ambiente.

- **Adaptación de las especies a la biodegradación del plástico**

La adaptación de las especies a la biodegradación del plástico es un proceso dinámico que involucra la evolución de microorganismos como bacterias y hongos, los cuales desarrollan nuevas enzimas y vías metabólicas para degradar moléculas de plástico. Este proceso se ve favorecido por la presencia de plástico en el medio ambiente, lo que confiere una ventaja selectiva a aquellos microorganismos capaces de degradarlo.

La adaptación de las especies a su entorno es un proceso constante, y en el caso del EPS, un plástico altamente resistente, la búsqueda de estrategias de biodegradación ha llevado a explorar el potencial de insectos omnívoros. Estos insectos, como las larvas de *Tenebrio molitor*, han demostrado ser capaces de degradar el EPS mediante enzimas y microorganismos simbioses, lo que abre nuevas perspectivas para la gestión de residuos plásticos (Yang et al., 2020a, 2020b, 2015 a, 2015b).

CAPÍTULO 3: ESPECIES DE LARVAS

Los coleópteros *Zophobas morio* y *Tenebrio molitor* tienen la singular eficacia de biodegradar EPS se debe a una combinación de características únicas, que se describen a continuación, y que los convierten en aliados valiosos en el desarrollo de soluciones innovadoras para mitigar el impacto ambiental de los plásticos.

3.1 *Zophobas morio*

En esta sección se describen las características generales de la especie *Zophobas morio*, que son utilizadas en la ejecución del presente estudio.

3.1.1 Ciclo de vida

El ciclo de vida de *Zophobas morio*, también conocido como el escarabajo de la harina, es un proceso fascinante que implica una serie de transformaciones que llevan al insecto desde su nacimiento hasta su madurez y reproducción. Comienza con la etapa de huevo, en la que la hembra deposita sus huevos blancos y ovalados en un lugar protegido, generalmente en materia orgánica en descomposición, como restos de alimentos o materia vegetal. Luego, las larvas emergen y pasan por varias etapas de crecimiento, alimentándose vorazmente de materia orgánica y descomponiéndola, lo que les permite crecer y fortalecerse. Durante esta etapa, las larvas pueden secretar enzimas que les permiten descomponer materiales complejos, como el EPS. Posteriormente, la larva se transforma en pupa, una etapa de transición crucial en la que se produce la metamorfosis que dará lugar al adulto. Finalmente, el adulto emerge, se alimenta y se reproduce, iniciando un nuevo ciclo. Este proceso dura aproximadamente 2-3 meses y puede variar dependiendo de factores ambientales, como la temperatura, la humedad y la disponibilidad de alimento. Lo que hace especialmente interesante a *Zophobas morio* es su capacidad para biodegradar plásticos, ya que sus larvas pueden descomponer polímeros como el EPS, lo que lo convierte en una especie prometedora para el desarrollo de soluciones innovadoras en la lucha contra la contaminación plástica (Albarracín & Clavijo, 2021; Daviran, 2017; Gómez y Sáiz, 2013; Park et al., 2013; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015; Yang et al 2020b, 2015a, 2015b). La etapa larvaria de *Zophobas morio* es especialmente relevante para la biodegradación debido a que las larvas poseen una capacidad única para descomponer polímeros como el EPS. Durante esta etapa, las larvas secretan enzimas que les permiten descomponer los plásticos en compuestos más simples, lo que las convierte en agentes potenciales para la degradación de residuos plásticos. Sin embargo, es importante destacar que esta capacidad se pierde una vez que las larvas alcanzan la metamorfosis y se transforman en adultos, lo que subraya la importancia de estudiar y aprovechar esta etapa larvaria para la biodegradación. Estas larvas pueden alcanzar hasta 6 cm de largo y 1 cm de ancho, y su ciclo de vida larval dura aproximadamente 4 meses en condiciones óptimas. Conocer el ciclo de vida de cada especie es fundamental para el diseño de metodologías, ya que el tiempo tiene una influencia directa en los resultados obtenidos. Además, entender las características y comportamientos de *Zophobas morio* puede ayudar a optimizar su uso en la biodegradación de plásticos y a desarrollar estrategias efectivas para su cultivo y manejo. La Figura 8 muestra las etapas del ciclo de vida de la especie *Zophobas morio*.



Figura 8. Etapas en el ciclo de vida de la *Zophoba morio*

Fuente: Fauna Exótica (2024)

3.1.2 Capacidad biodegradadora

Las larvas de *Zophobas morio* poseen una capacidad biodegradadora excepcional, capaz de descomponer polímeros como el poliestireno expandido (EPS) en solo 3-4 semanas, comparable a la capacidad de algunos microorganismos especializados en la degradación de plásticos. Esta capacidad se debe a la producción de enzimas específicas, como la lipasa y la proteasa, que permiten a las larvas descomponer los plásticos en compuestos más simples. Además, pueden descomponer otros tipos de plásticos, como el polipropileno y el polietileno, y su producción de enzimas es inducida por la presencia de plásticos en su entorno (Albarracín & Clavijo, 2021; Daviran, 2017; Gómez y Sáiz, 2013; Park et al., 2013; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015; Yang et al., 2020b, 2015a, 2015b). Esta capacidad les permite descomponer el EPS y otros materiales orgánicos de manera eficiente, convirtiéndolas en agentes potenciales para la degradación de residuos plásticos. Sin embargo, durante la metamorfosis, las larvas experimentan cambios fisiológicos y morfológicos que les permiten transformarse en adultos, perdiendo la capacidad de

producir las enzimas necesarias para descomponer plásticos. En la etapa adulta, el sistema digestivo de *Zophobas morio* se adapta para procesar alimentos más complejos, pero pierde la capacidad biodegradadora, por lo tanto, esta capacidad se pierde una vez que las larvas alcanzan la metamorfosis y se transforman en adultos.

3.1.3 Factores ambientales

El desarrollo óptimo de las larvas de *Zophobas morio* está estrechamente vinculado a las condiciones ambientales. Un rango de temperatura entre 26°C y 30°C, combinado con una humedad ambiental del 70%, crea un entorno idóneo para su crecimiento y supervivencia. Sin embargo, la falta de alimento puede desencadenar un comportamiento caníbal entre las larvas, lo que puede tener consecuencias negativas en su desarrollo y supervivencia (Albarracín & Clavijo, 2021; Park et al., 2013; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

La temperatura desempeña un papel crucial en su ciclo de vida. La temperatura óptima permite que las larvas mantengan un metabolismo saludable, lo que a su vez regula su desarrollo y crecimiento. Sin embargo, cuando la temperatura es menor a la ideal, el metabolismo de la larva se ralentiza, lo que conlleva a una serie de consecuencias negativas. En primer lugar, la metamorfosis a estado de pupa se retrasa, lo que prolonga el estado larvario. Esto significa que las larvas necesitan más tiempo para alcanzar la madurez, lo que incrementa su vulnerabilidad a factores externos, como depredadores, enfermedades y condiciones ambientales adversas. Además, un metabolismo lento puede afectar la capacidad de las larvas para producir enzimas digestivas, lo que puede reducir su eficiencia en la descomposición de materia orgánica. Esto puede tener un impacto significativo en su capacidad para desempeñar su papel en la biodegradación de plásticos y otros materiales orgánicos. (Albarracín & Clavijo, 2021; Park et al., 2013; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

Además, la supervivencia y el desarrollo de *Zophobas morio* están influenciados por una variedad de factores ambientales que pueden tener un impacto significativo en su dinámica poblacional y capacidad para desempeñar su papel en la biodegradación de plásticos. La humedad, por ejemplo, es fundamental para el crecimiento y desarrollo de las larvas, ya que un ambiente demasiado seco puede ralentizar su metabolismo y reducir su capacidad para descomponer materia orgánica. La disponibilidad de alimento también es crucial, ya que las larvas necesitan una dieta rica en nutrientes para crecer y desarrollarse adecuadamente. La falta de alimento puede llevar a un comportamiento caníbal y reducir

la población. La presencia de depredadores, como arañas y escarabajos, puede reducir la población de *Zophobas morio* y afectar su capacidad para desempeñar su papel en la biodegradación. La calidad del suelo y la disponibilidad de agua también son fundamentales, ya que las larvas necesitan un ambiente con condiciones óptimas para crecer y desarrollarse. La contaminación ambiental, la luz y la oscuridad, y la densidad de población también pueden tener un impacto significativo en la supervivencia y el desarrollo de *Zophobas morio* (Albarracín & Clavijo, 2021; Park et al., 2013; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

Para que las larvas de *Zophobas morio* puedan descomponer materia orgánica de manera eficiente, es fundamental que se encuentren en un entorno con condiciones óptimas de temperatura y humedad. La temperatura ideal para este proceso es entre 25-30°C, ya que permite que las larvas produzcan enzimas digestivas esenciales para la descomposición de la materia orgánica. Si la temperatura es demasiado baja, el metabolismo de las larvas se ralentiza, lo que reduce su capacidad para producir enzimas y descomponer materia orgánica. Por otro lado, la humedad relativa debe estar entre 60-70%, ya que un ambiente demasiado seco puede ralentizar el proceso de descomposición y afectar la producción de enzimas. Si la humedad es demasiado baja, las larvas pueden sufrir estrés hídrico, lo que reduce su capacidad para descomponer materia orgánica. Además, un ambiente con condiciones óptimas de temperatura y humedad permite que las larvas crezcan y se desarrollen adecuadamente, lo que aumenta su capacidad para descomponer materia orgánica. Por lo tanto, es fundamental mantener un entorno con condiciones óptimas de temperatura y humedad para maximizar la eficiencia de las larvas de *Zophobas morio* en la descomposición de materia orgánica (Albarracín & Clavijo, 2021; Park et al., 2013; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

Es crucial considerar los factores ambientales para crear un entorno óptimo para *Zophobas morio*, ya que esto permite maximizar su potencial biodegradador y asegurar su supervivencia. Al comprender cómo cada factor ambiental afecta a las larvas, se pueden tomar medidas específicas para optimizar sus condiciones de crecimiento y desarrollo. Por ejemplo, al entender cómo la temperatura y la humedad afectan la producción de enzimas y la descomposición de materia orgánica, podemos ajustar estos parámetros para crear un entorno ideal para las larvas. De igual manera, al conocer el impacto de la disponibilidad de alimento y la presencia de depredadores, podemos tomar medidas para asegurar una dieta adecuada y proteger a las larvas de posibles amenazas.

Al optimizar las condiciones de crecimiento y desarrollo de *Zophobas morio*, podemos aumentar su capacidad para descomponer plásticos y otros materiales orgánicos, lo que a su vez puede contribuir a reducir la contaminación ambiental y promover un entorno más sostenible. Por lo tanto, es fundamental considerar estos factores ambientales para maximizar el potencial biodegradador de *Zophobas morio*.

3.2 Tenebrio molitor

3.2.1 Ciclo de vida

La metamorfosis completa de *Tenebrio molitor*, también conocida como "gusano de harina", comprende cuatro etapas: huevo, larva, pupa y adulto. La etapa larvaria es la más relevante para la biodegradación, ya que las larvas pueden alcanzar hasta 4 cm de largo y 0.5 cm de ancho, y su ciclo de vida larval dura aproximadamente 2 meses en condiciones óptimas de temperatura, humedad, oscuridad, entre otras ([Arellano & Velásquez, 2017](#); [Wang, Y., & Shelomi, M., 2015](#)).

El ciclo de vida de *Tenebrio molitor* es un proceso complejo que implica una serie de etapas que están influenciadas por factores ambientales y fisiológicos. La etapa de huevo es la primera fase del ciclo de vida, durante la cual el desarrollo embrionario requiere un período de tiempo específico para completarse, lo que dura aproximadamente 1-2 semanas. Durante este tiempo, el embrión experimenta una serie de divisiones celulares y diferenciaciones que lo llevan a formar un individuo completo ([Arellano & Velásquez, 2017](#), [Wang, Y., & Shelomi, M., 2015](#)). En la [Figura 9](#) se encuentra un resumen del ciclo de vida de esta especie.

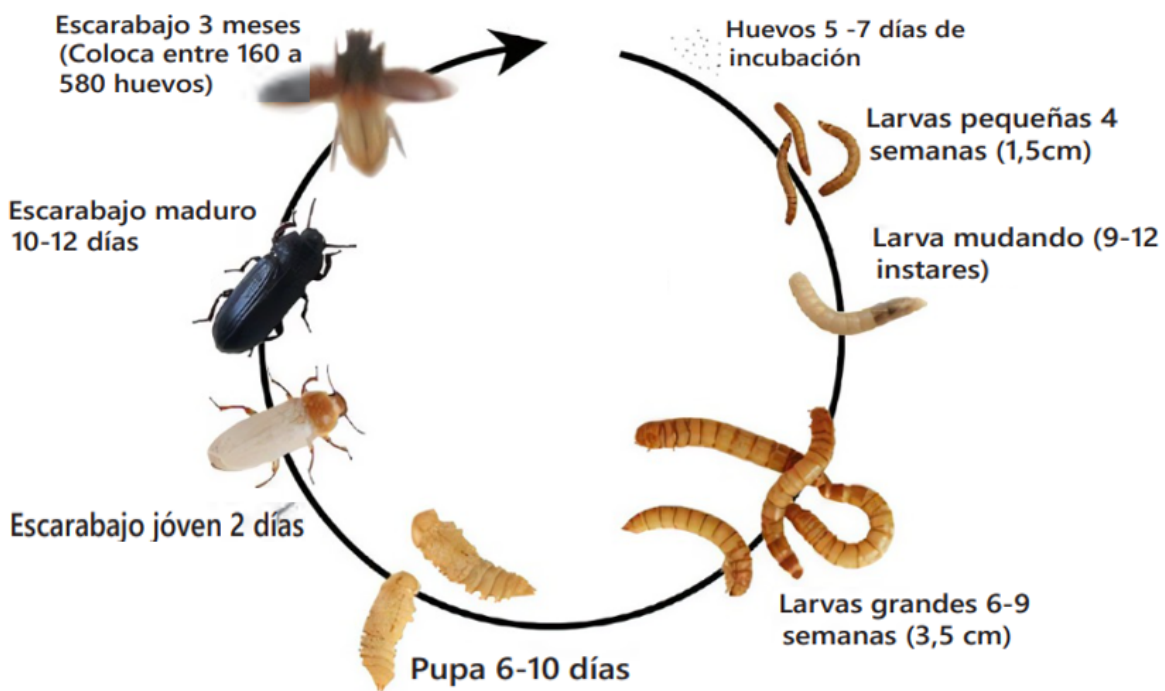


Figura 9. Etapas en el ciclo de vida del *Tenebrio molitor*.

Fuente: Artigas (1994)

A continuación, se inicia la etapa larvaria, que dura alrededor de 6-8 semanas. Durante este período, las larvas se alimentan de harina y granos, y experimentan una serie de ecdisis o mudas que les permiten crecer y desarrollarse (Arellano & Velásquez, 2017; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015). La muda es un proceso necesario para permitir el crecimiento y la renovación de los tejidos teniendo en su desarrollo 20 mudas lo cual equivale a 10 estadios o instares (Artigas, 1994). Es decir, cada instar equivale a 2 mudas de piel de una larva.

Después de la etapa larvaria, se produce la etapa de pupa, que dura aproximadamente 1-2 semanas. Durante este tiempo, las pupas se transforman en adultos, lo que implica una serie de cambios morfológicos y fisiológicos que les permiten convertirse en individuos reproductivos (Arellano & Velásquez, 2017 y Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

Finalmente, se inicia la etapa adulta, que dura alrededor de 2-3 meses. Durante este tiempo, los adultos buscan alimento y parejas para reproducirse, lo que les permite asegurar la supervivencia de la especie. La duración de esta etapa está influenciada por factores como la disponibilidad de alimento y la presencia de depredadores (Arellano & Velásquez, 2017, Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

En resumen, el ciclo de vida de *Tenebrio molitor* es un proceso complejo que implica una serie de etapas que están influenciadas por factores ambientales y fisiológicos. La comprensión de estos procesos es fundamental para entender la biología de esta especie y su papel en la biodegradación de plásticos y otros materiales.

Cada etapa del ciclo de vida de *Tenebrio molitor* está influenciada por factores ambientales y fisiológicos que determinan su duración y características. La comprensión de estos procesos es fundamental para entender la biología de esta especie y su papel en la biodegradación de plásticos y otros materiales.

3.2.2 Capacidad biodegradadora

Las larvas de *Tenebrio molitor* poseen una capacidad biodegradadora única, que les permite descomponer una variedad de materiales, incluyendo plásticos, grasas y proteínas. Esta capacidad se debe a la presencia de enzimas digestivas especializadas en su sistema digestivo, que les permiten romper los enlaces químicos de los materiales y convertirlos en nutrientes (Albarracín & Clavijo, 2021; Arellano & Velásquez, 2017; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

En particular, las larvas de esta especie tienen una alta capacidad para degradar plásticos, especialmente el poliestireno y el polietileno, que son dos de los plásticos más comunes y difíciles de degradar. Esto se debe a que las larvas producen enzimas como la lipasa y la esterasa, que pueden romper los enlaces químicos de los plásticos y convertirlos en ácidos grasos y glicerol (Albarracín & Clavijo, 2021; Arellano & Velásquez, 2017; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

Además, las larvas de esta especie también pueden degradar grasas y proteínas, lo que les permite alimentarse de una variedad de fuentes de alimento. Esto se debe a que las larvas producen enzimas como la lipasa y la proteasa, que pueden romper los enlaces químicos de las grasas y proteínas y convertirlos en nutrientes (Albarracín & Clavijo, 2021; Arellano & Velásquez, 2017; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

La capacidad biodegradadora de las larvas de *Tenebrio molitor* tiene un gran potencial para ser utilizada en la biodegradación de residuos plásticos y otros materiales, lo que podría ayudar a reducir la contaminación ambiental y promover la sostenibilidad.

Las larvas de esta especie tienen una capacidad única para consumir y biodegradar EPS, un tipo de plástico ampliamente utilizado en embalajes y otros productos. Aunque lo hacen

con menor eficiencia que las larvas de *Zophobas morio*, este proceso es aún significativo y tiene implicaciones importantes para el tratamiento de residuos plásticos. La biodegradación del EPS por las larvas de *Tenebrio molitor* se debe a la acción de microorganismos simbiosis presentes en su intestino. Estos microorganismos producen enzimas que rompen los enlaces químicos del EPS, permitiendo que las larvas lo digieran y lo conviertan en nutrientes.

Este proceso es fascinante porque muestra cómo las larvas de *Tenebrio molitor* han evolucionado para aprovechar una fuente de alimento que sería tóxica para muchos otros organismos. Además, la capacidad de biodegradar plásticos tiene implicaciones importantes para el tratamiento de residuos y la reducción de la contaminación ambiental.

La investigación sobre la biodegradación de plásticos por las larvas de *Tenebrio molitor* y otros insectos es un campo en constante evolución, con nuevos descubrimientos y aplicaciones potenciales en el tratamiento de residuos plásticos y la reducción de la contaminación ambiental.

En resumen, las larvas de *Tenebrio molitor* poseen una capacidad biodegradadora única y versátil, que les permite descomponer una variedad de materiales, incluyendo plásticos, grasas y proteínas. Esta capacidad tiene un gran potencial para ser utilizada en la biodegradación de residuos plásticos y otros materiales, lo que podría ayudar a reducir la contaminación ambiental y promover la sostenibilidad.

3.2.3 Factores ambientales

Los factores ambientales que influyen en *Tenebrio molitor* son fundamentales para su crecimiento, desarrollo y supervivencia. El rango de temperatura óptimo para esta especie está entre los 25 y los 30°C, lo que permite un crecimiento y desarrollo adecuados. Temperaturas extremas pueden afectar negativamente su supervivencia y reproducción. La humedad relativa óptima para *Tenebrio molitor* es entre 50-70%. Una humedad excesiva puede provocar la proliferación de hongos y bacterias perjudiciales, mientras que una humedad baja puede afectar su desarrollo (Albarracín & Clavijo, 2021; Arellano & Velásquez, 2017; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

La luz es otro factor importante en el entorno de *Tenebrio molitor*, ya que estos organismos tienen una clara preferencia por la oscuridad o la luz tenue. La exposición a luz intensa puede tener efectos negativos en su comportamiento y biología, inhibiendo su actividad y

reproducción. La luz brillante puede estresar a los insectos, haciendo que se sientan expuestos y vulnerables, lo que lleva a una disminución en su actividad y movilidad. Además, la luz intensa puede interferir con sus ciclos circadianos naturales, alterando sus patrones de alimentación, reproducción y crecimiento. Por lo tanto, es fundamental proporcionar un entorno con luz tenue o oscuridad para promover el bienestar y el éxito reproductivo de *Tenebrio molitor* (Albarracín & Clavijo, 2021; Arellano & Velásquez, 2017; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

La disponibilidad de alimento es fundamental para el crecimiento y desarrollo de *Tenebrio molitor*. Sin una dieta constante de granos, harinas y otros materiales orgánicos, su metabolismo y supervivencia se verían gravemente afectados. La falta de nutrientes esenciales retrasaría su crecimiento y desarrollo, lo que podría llevar a una menor tasa de reproducción y una mayor mortalidad. Además, una dieta inadecuada podría debilitar su sistema inmunológico, haciéndolos más vulnerables a enfermedades y patógenos. Por lo tanto, es crucial proporcionar una variedad de alimentos frescos y nutritivos para garantizar su bienestar y éxito en la cría (Albarracín & Clavijo, 2021; Arellano & Velásquez, 2017; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

El oxígeno es fundamental para el metabolismo y supervivencia de *Tenebrio molitor*. La ausencia o falta de oxígeno puede tener efectos perjudiciales en su desarrollo y reproducción, ya que es esencial para la respiración celular y la producción de energía. Sin oxígeno suficiente, las larvas de *Tenebrio molitor* pueden experimentar un crecimiento lento, una disminución en su actividad y una reducción en su capacidad reproductiva. Por lo tanto, es crucial mantener un ambiente con niveles adecuados de oxígeno para garantizar su bienestar y supervivencia (Albarracín & Clavijo, 2021; Arellano & Velásquez, 2017; Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

La presencia de contaminantes químicos y biológicos en el ambiente puede tener un impacto negativo en la supervivencia y reproducción. Estos contaminantes pueden incluir sustancias químicas tóxicas, metales pesados, pesticidas, bacterias, virus y hongos, entre otros. La exposición a estos contaminantes puede causar daños en la salud de las larvas, reducir su crecimiento y desarrollo, y afectar su capacidad reproductiva (Wang, Y., & Shelomi, M., 2015).

La densidad poblacional es un factor crucial que puede impactar significativamente en la supervivencia y reproducción de *Tenebrio molitor*. Cuando la densidad poblacional es alta,

las larvas compiten por recursos limitados, como alimento y espacio, lo que puede generar estrés y disminuir su bienestar. Esto puede llevar a una reducción en su crecimiento y desarrollo, así como a una disminución en su capacidad reproductiva. Por lo tanto, es fundamental mantener una densidad poblacional adecuada para garantizar el bienestar de *Tenebrio molitor*. Una densidad poblacional óptima garantiza que las larvas tengan acceso a suficientes recursos, como alimento y espacio, lo que reduce la competencia y el estrés entre ellas. Esto permite un crecimiento y desarrollo saludables, ya que las larvas pueden alimentarse y moverse libremente sin la presión de la competencia. Además, también promueve una reproducción exitosa, ya que los adultos pueden encontrar parejas y reproducirse sin la presión de la sobrepoblación.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para investigar la biodegradación de EPS por las larvas de *Zophobas morio* y *Tenebrio molitor*. Se describen los pasos

metodológicos seguidos para recopilar y analizar los datos, con el objetivo de evaluar la capacidad de consumo y degradación de EPS. Para abordar este complejo fenómeno de biodegradación, se diseñó un experimento mixto que combina factores cuantitativos y cualitativos. A continuación, se detallan las etapas de la investigación, desde la planificación inicial hasta el análisis de los datos obtenidos, incluyendo los procedimientos seguidos en cada fase del experimento.

La metodología utilizada para la crianza de *Zophobas morio* es igualmente aplicable para la crianza de *Tenebrio molitor*, debido a que ambos coleópteros comparten características fisiológicas muy similares. En la [Figura 10](#) se observa un espécimen de *Zophobas morio* consumiendo plumavit.



Figura 10. Especimen de *Zophobas morio* consumiendo plumavit.

Fuente: Elaboración propia.

4.1 Metodología empleada en el cultivo de larvas de *Zophobas morio*

La metodología mixta simultánea empleada en esta investigación es ideal para el cultivo de larvas de *Zophobas morio*, ya que permite una comprensión integral del fenómeno estudiado. Al combinar técnicas cuantitativas y cualitativas, se pueden recopilar y analizar datos de manera simultánea y complementaria, lo que facilita una mayor comprensión de la realidad.

La utilización de ambos enfoques en un solo estudio, según [Johnson y Onwuegbuzie \(2004\)](#), permite una comprensión más completa del fenómeno, ya que se pueden abordar diferentes aspectos del cultivo de larvas de *Zophobas morio* de manera simultánea. Por ejemplo, se pueden recopilar datos cuantitativos sobre el crecimiento y desarrollo de las

larvas, mientras que se realizan observaciones cualitativas sobre su comportamiento y hábitat.

La metodología mixta simultánea ofrece una ventaja significativa en el cultivo de larvas de *Zophobas morio*, ya que permite adaptar las técnicas y métodos según sea necesario. Esto es crucial en un entorno donde las condiciones ambientales y los factores biológicos pueden cambiar rápidamente, afectando el crecimiento y desarrollo de las larvas. Al utilizar una metodología mixta simultánea, los investigadores pueden responder rápidamente a estos cambios y ajustar su enfoque para asegurar que los datos recopilados sean precisos y relevantes. Por ejemplo, si se detecta un cambio en la temperatura o la humedad que afecta el crecimiento de las larvas, los investigadores pueden adaptar sus técnicas de recolección de datos para tomar en cuenta estos cambios. Además, la flexibilidad de la metodología mixta simultánea permite a los investigadores explorar nuevas preguntas de investigación que surgen durante el estudio. Por ejemplo, si se observa un comportamiento inesperado en las larvas, los investigadores pueden adaptar su enfoque para investigar más a fondo este fenómeno.

4.1.1 Pre-planificación experimental

La pre-planificación experimental es un paso fundamental y crucial en la investigación científica, ya que permite establecer los objetivos, métodos y procedimientos para llevar a cabo un estudio de manera efectiva y eficiente. Esta etapa inicial es esencial para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados, así como para minimizar errores y optimizar los recursos disponibles. En este caso, se realizó una investigación inicial para determinar los factores clave para mantener una colonia de aproximadamente 2000 especímenes de *Zophobas morio* en una residencia domiciliaria. Esto incluyó la determinación de la dieta y las condiciones ambientales óptimas para el crecimiento y desarrollo de las larvas.

Es importante destacar que esta investigación se llevó a cabo en un contexto particularmente desafiante, ya que se realizó durante el estado de excepción constitucional de catástrofe declarado en Chile en 2020 debido a la pandemia de COVID-19. En Chile, el Decreto de Ley N° 104, estableció medidas excepcionales para proteger la salud pública, lo que complicó la logística y la realización de la investigación.

A pesar de estos desafíos, la pre-planificación experimental permitió identificar los factores críticos para el éxito del estudio y adaptar los protocolos para minimizar los

riesgos y garantizar la seguridad de los investigadores y los especímenes. Esto incluyó la implementación de medidas de bioseguridad y el diseño de un protocolo de estudio flexible que pudiera adaptarse a las circunstancias cambiantes.

4.1.2 Mantenimiento de colonias de *Zophobas morio*

Esta tabla es un tipo de diagrama de Gantt, una herramienta visual muy utilizada en la gestión de proyectos para planificar y programar tareas a lo largo del tiempo. En este caso, se emplea para organizar las actividades relacionadas con el mantenimiento de colonias de *Zophobas morio*, esta tabla proporciona una visión general de las tareas necesarias para mantener las colonias en estudio durante un período de siete meses. Permite visualizar la frecuencia y el tipo de actividades realizadas, y puede ser útil para planificar y evaluar el progreso del proyecto.

Las actividades que se llevaron a cabo son las siguientes:

- Actividad 1: Limpieza de contenedores.
- Actividad 2: Monitoreo de salud y crecimiento.
- Actividad 3: Obtención de pupas/larvas.
- Actividad 4: Administración de RBD.
- Actividad 5: Registro y análisis de datos.
- Actividad 6: Monitoreo de temperatura y humedad.

Estas actividades fueron llevadas a cabo de acuerdo al orden de necesidades para mantener una colonia de tenebrios según la investigación realizada en la etapa pre-experimental. Dichas actividades están especificadas en la Carta Gantt de la [Tabla 1](#). Nótese que la mantención de los contenedores (mostrados en la [Figura 11](#)) se lleva a cabo cada 2 meses con el fin de monitorear y mantener las condiciones en las cuales se desarrolla el experimento.

Tabla 1. Carta Gantt actividad de mantención de colonias.

Actividades	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7
Actividad 1	1	-	1	-	1	-	1
Actividad 2	10	10	10	10	10	10	10
Actividad 3	-	-	-	-	-	-	3

Actividad 4	2	2	2	2	2	2	2
Actividad 5	3	2	2	2	2	2	2
Actividad 6	31	30	31	30	31	30	31

Fuente: Elaboración propia

Se seleccionaron 9 cajas plásticas con dimensiones precisas de 30 cm de ancho, 11 cm de alto y 17 cm de profundidad para albergar las colonias de larvas. Cada caja estaba diseñada para proporcionar un ambiente óptimo, con una base de harina renovada cada dos meses para mantener la frescura y bandejas de huevo integradas que servían como refugio para las larvas, ocupando aproximadamente la mitad de la superficie disponible.



Figura 11. Vista lateral y superior de los contenedores

Fuente: Elaboración propia

Para garantizar la ventilación adecuada, las cajas estaban perforadas con orificios estratégicamente colocados, y para facilitar la identificación de los grupos, se utilizaron etiquetas claras y legibles. Además, se implementó un sistema de monitoreo ambiental mediante un termómetro/higrómetro que registraba diariamente la temperatura y humedad en cada caja, tal como se observa en la [Figura 12](#). Este aparato se rotaba cada 3 a 7 días para asegurar una medición precisa y efectiva de las condiciones de las colonias,

permitiendo así ajustar los parámetros según sea necesario para mantener un ambiente óptimo para el crecimiento y desarrollo de las larvas.



Figura 12. Sistema de monitoreo de humedad mediante higrómetro instalado con sus sensores al interior de una de las cajas.

Fuente: Elaboración propia.

Cada caja estaba poblada por aproximadamente 200 individuos, que fueron objeto de revisiones periódicas y exhaustivas para evaluar su estado de salud, crecimiento y respuesta fisiológica a las diferentes dietas y condiciones ambientales controladas. A pesar de que las larvas de *Zophobas morio* son capaces de sobrevivir y completar su ciclo de vida con una dieta exclusiva de PE, como lo demostró [Yang en 2020](#), se decidió establecer tres dietas diferentes para evaluar la respuesta de las larvas a variedades nutricionales distintas.

Estas dietas se distribuyeron en tres colonias por dieta, lo que dio un total de nueve grupos experimentales. Esta distribución permitió evaluar la variabilidad en la respuesta de las larvas a las diferentes dietas y condiciones ambientales, lo que a su vez brindó una comprensión más profunda de sus necesidades nutricionales y requisitos ambientales. Los grupos se establecieron de la siguiente manera:

- **Grupo A:** Este grupo servirá como punto de referencia para evaluar el crecimiento y comportamiento de las larvas de *Zophobas morio* bajo condiciones naturales, recibiendo una dieta exclusivamente orgánica compuesta por desechos domiciliarios de frutas y verduras, sin la adición de polímeros sintéticos como el EPS. Al mantener una dieta tradicional, se busca establecer un parámetro de comparación para evaluar los efectos de las dietas experimentales en los demás grupos, permitiendo identificar posibles diferencias en el desarrollo, supervivencia y reproducción de las larvas. De esta manera, el grupo de control desempeña un papel crucial en la investigación, brindando una línea base para analizar la influencia de las variables estudiadas.
- **Grupo B:** Este grupo será sometido a una dieta mixta, compuesta por material orgánico y un trozo de EPS de aproximadamente 6 g, con el objetivo de evaluar la ingesta y el consumo de este polímero por parte de las larvas. El EPS se retirará periódicamente para medir el consumo y evaluar la tasa de ingesta, lo que permitirá determinar si las larvas lo aceptan como fuente de alimento y en qué medida. En caso de que las larvas dejen de consumir o ignoren el EPS, se reemplazará por un nuevo trozo con las mismas características, asegurando así una exposición continua a este polímero y permitiendo evaluar si las larvas desarrollan una preferencia o aversión hacia él. Este grupo es crucial para entender la interacción entre las larvas y el PE, y cómo esta interacción afecta su crecimiento y desarrollo.
- **Grupo C:** Esta colonia se someterá a una dieta exclusiva de EPS, con una masa aproximada de 12 g, con el objetivo de evaluar la viabilidad de este polímero como única fuente de alimento para las larvas. Al igual que en el Grupo B, el EPS se retirará solo si las larvas dejan de consumirlo o lo ignoran, lo que permitirá determinar si las larvas pueden sobrevivir y crecer con una dieta exclusiva de EPS. Para mantener un ambiente óptimo y evitar enfermedades, todo material orgánico se retirará inmediatamente si muestra signos de descomposición, lo que incluye la eliminación de restos de alimentos y la prevención de la invasión de organismos ajenos al estudio. Por otro lado, el EPS permanecerá en la caja de manera constante, siendo retirado únicamente para realizar pesajes y evaluar el consumo, lo que permitirá monitorear la ingesta y el crecimiento de las larvas a lo largo del estudio. Esta colonia es crucial para entender la capacidad de las larvas para adaptarse a una dieta no tradicional y evaluar los efectos a largo plazo del consumo exclusivo de EPS.

4.1.3 Cuantificación del consumo de EPS

A continuación, se presentarán los resultados de los grupos B y C, que recibieron diferentes concentraciones de EPS, para medir la tasa de consumo de este material en función del tiempo. Para ilustrar de manera resumida las fases del consumo, éstas se muestran en la [Figura 13](#).

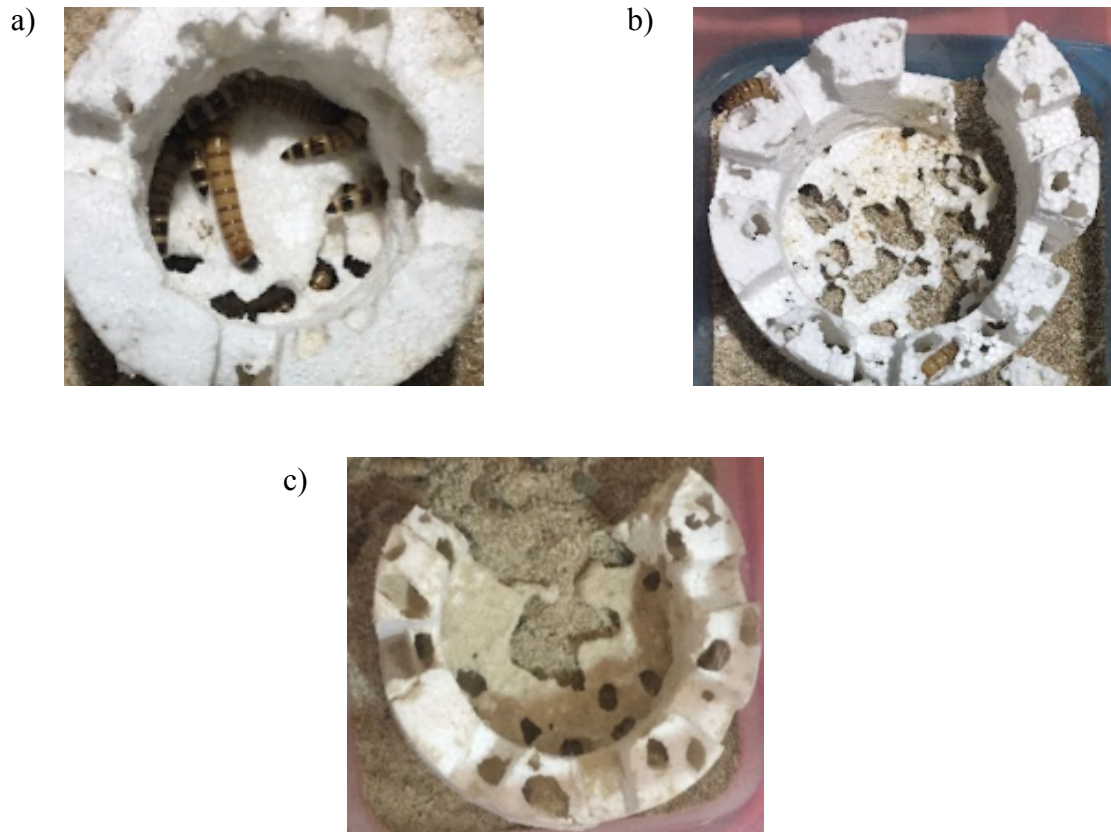


Figura 13. Consumo de EPS por parte de *Zophobas morio*. a) Fase inicial del consumo. b) Fase Intermedia. c) Fase final.

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior permitirá evaluar la capacidad de las larvas de *Zophobas morio* para biodegradar el EPS y establecer una relación cuantitativa entre la cantidad de poliestireno consumido y las variables experimentales, como el tamaño de partícula del poliestireno, el tiempo de residencia y la cantidad de larvas. Esto es crucial para optimizar el diseño del experimento, estableciendo los parámetros operativos adecuados, como la cantidad óptima

de larvas, el tiempo de residencia ideal y el tamaño de partícula del poliestireno que maximice la biodegradación.

Para cuantificar la capacidad de consumo de EPS por las larvas de *Zophobas morio*, se retiran periódicamente los trozos de EPS para realizar su pesaje, lo que permitirá monitorear la ingesta de EPS a lo largo del tiempo. Este procedimiento permitirá determinar la tasa de consumo de EPS y evaluar la eficiencia de las larvas en la biodegradación de este material, lo que a su vez permitirá estimar la capacidad de procesamiento de las larvas y optimizar el diseño del sistema de biodegradación.

Tabla 2. Masa de EPS ingerido en grupo B.

Mes	Recipiente 1 /g	Recipiente 2 /g	Recipiente 3 /g
Septiembre	0,19	0,15	0,19
Octubre	0,35	0,13	0,13
Noviembre	0,08	0,12	0,24
Diciembre	0,04	0,03	0,02

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Masa de EPS ingerido en grupo C.

Mes	Recipiente 1 /g	Recipiente 2 /g	Recipiente 3 /g
Septiembre	0	0,15	0,39
Octubre	0,63	0,45	0,80
Noviembre	0,19	0,35	0,08
Diciembre	0,16	0,06	0

Fuente: Elaboración propia.

Las [Tablas 2 y 3](#) revelan que el consumo máximo de EPS por parte de las larvas de los grupos B y C se alcanzó en el mes de octubre. En los meses posteriores, se observa una disminución significativa en el consumo. Este descenso se atribuye a dos factores principales: una menor disponibilidad de EPS en el recipiente y una reducción en el número de larvas, debido tanto a la transición al estado de pupa como a las pérdidas por mortalidad, las cuales son analizadas en detalle en el punto 4.2.

4.1.4 Consumo de RBD por parte de *Zophobas morio*

Como se mencionó en el punto 4.1.2, los grupos A y B fueron alimentados con asimilables a un RBD, compuestos principalmente por restos de fruta (Figura 14). Aunque el consumo de este alimento por parte de las larvas pueda parecer obvio, es fundamental evaluar su impacto en las condiciones de la colonia. La introducción de fruta podría aumentar la humedad, atraer otros organismos y favorecer la proliferación de hongos. Sin embargo, también podría proporcionar nutrientes y agua, reduciendo la necesidad de canibalismo y contribuyendo a un mejor desarrollo larval. Además, la inclusión del RBD en el experimento permite explorar una estrategia adicional para reducir los residuos orgánicos.



Figura 14. Larvas de *Zophobas morio* consumiendo manzana.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Observaciones cualitativas en el experimento *Zophobas morio*

Durante el transcurso del experimento, se registraron varias observaciones cualitativas que podrían tener un impacto significativo en la tasa de consumo de poliestireno por parte de las larvas de *Zophobas morio*. Entre estas observaciones se encuentran:

- **Impregnación del sustrato:** La presencia de sustancias como harina y la humedad en el sustrato pueden afectar la masa total y, por ende, los cálculos estequiométricos. Esto sugiere que la composición del sustrato puede influir en la tasa de consumo de poliestireno por parte de las larvas. Es importante considerar la pureza y homogeneidad del sustrato para evitar errores en los cálculos.
- **Mortalidad de larvas:** La variabilidad en la tasa de mortalidad relacionada con la densidad poblacional, la cantidad de alimento disponible y las condiciones de

humedad sugiere que estos factores pueden afectar significativamente la supervivencia de las larvas. Es crucial controlar estas variables para asegurar la viabilidad del experimento.

- **La detección de olores inusuales:** Este puede ser un indicador clave de que se está produciendo un cambio en el material o en el entorno. En el caso del poliestireno, la descomposición puede generar olores desagradables debido a la liberación de compuestos químicos volátiles. Por otro lado, la actividad de las larvas también puede producir olores inusuales, como un olor a descomposición o putrefacción, o un aroma a tierra húmeda o mohosa.
- **Efecto de la luminosidad:** La preferencia de las larvas por la oscuridad y su evasión de las zonas expuestas a la luz sugiere que la luminosidad puede influir en su comportamiento alimentario y distribución espacial. Esto podría afectar la tasa de consumo de poliestireno y, por lo tanto, es importante considerar la iluminación en el diseño del experimento.
- **Cambios en la consistencia o estructura del sustrato:** Esto podría tener un impacto significativo en la movilidad y el acceso a nutrientes para las larvas, lo que a su vez puede influir en su crecimiento y desarrollo. La compactación del sustrato, puede restringir la movilidad de las larvas, dificultando su desplazamiento y búsqueda de alimento. Por otro lado, la desintegración del sustrato puede generar un entorno inestable, donde las larvas enfrentan dificultades para encontrar un lugar seguro para crecer y desarrollarse. Además, los cambios en la humedad del sustrato pueden alterar la disponibilidad de nutrientes, lo que puede tener un efecto directo en el crecimiento y desarrollo de las larvas.
- **La presencia de estructuras creadas por las larvas en el sustrato:** Estas estructuras sugieren que las larvas están exhibiendo comportamientos de anidación o refugio, una estrategia común en muchas especies de insectos. La construcción de estas estructuras puede estar motivada por la necesidad de protección contra depredadores o condiciones ambientales adversas, así como por el deseo de crear un entorno estable y seguro para crecer y desarrollarse. Además, la presencia de nidos o túneles compartidos puede indicar comportamientos sociales complejos, como la cooperación y la interacción entre individuos.
- **Variaciones en la coloración o textura de las larvas:** lo que podría indicar cambios en su estado de salud o desarrollo. Estos cambios pueden deberse a una variedad de factores, incluyendo una dieta inadecuada o deficiente en nutrientes esenciales, la

presencia de patógenos o parásitos, factores ambientales como la temperatura, humedad o exposición a productos químicos y alteraciones en el proceso de desarrollo. Es importante monitorear y analizar estas variaciones para identificar posibles problemas y tomar medidas correctivas para asegurar la salud y bienestar de las larvas.

- **Presencia de ácaros:** La detección de ácaros en algunos cultivos puede ser un indicador de contaminación que compromete el desarrollo de las larvas. Los ácaros pueden interactuar con las larvas o influir en el proceso de biodegradación, por lo que es crucial implementar medidas de control para prevenir su propagación y garantizar la integridad del experimento. Para ello, se pueden utilizar métodos de control químicos o biológicos, como el uso de acaricidas o la modificación de las condiciones ambientales. Es importante tener en cuenta que la presencia de ácaros puede ser un síntoma de problemas subyacentes en el cultivo, como la humedad excesiva, la falta de ventilación o la acumulación de materia orgánica en descomposición. Por lo tanto, es fundamental identificar y abordar la causa raíz del problema para prevenir la contaminación y asegurar el éxito del experimento.

En resumen, estas observaciones cualitativas destacan la importancia de controlar variables ambientales y de sustrato para asegurar la viabilidad y precisión del experimento. Al considerar estos factores, se puede optimizar el diseño experimental y obtener resultados más precisos sobre la tasa de consumo de poliestireno por parte de las larvas de *Zophobas morio*.

4.3 Metodología empleada en el cultivo de larvas de *Tenebrio molitor*

Usando una metodología similar a la usada en el caso de las *Zophobas morio*, se registraron los consumos respectivos de EPS y RBD, bajo condiciones parecidas, las cuales se observan en el [Anexo A - Bitácora *Zophobas*](#).

Es posible determinar una tasa de consumo relativa entre el RBD y el EPS con los datos obtenidos, de tal manera que se pueda estimar un consumo de RBD si el estudio se centra en el de EPS, como es el caso.

En uno de los pre-experimentos, las condiciones internas de los recipientes (humedad, ventilación, iluminación y alimento) fueron tales que se produjo una excesiva proliferación de ácaros, los que terminaron por invadir dicha colonia de *Tenebrio molitor*, observándose posteriormente que no completaron su ciclo reproductivo. Es decir, no se detectó la

presencia de larvas pequeñas, indicando esto que los huevos no llegaron a eclosionar, atribuyéndose como la causa más probable de esta situación al hecho de que dichos ácaros también consumieron los huevecillos. En la sección 4.2 ya se mencionó este tipo de riesgos para las colonias.

Como mitigación, minimización o eliminación de la presencia de ácaros en las colonias, se tomaron las siguientes medidas:

1. Doble recipiente.
2. Aplicación de acaricida comercial cada dos meses.

CAPÍTULO 5: MARCO LEGAL

En Chile, la legislación ambiental ha evolucionado en las últimas décadas para abordar los desafíos asociados a la gestión de residuos. Este marco teórico tiene como objetivo analizar cómo las leyes y normas chilenas actuales se relacionan con la biodegradación del poliestireno utilizando larvas, y explorar si existen oportunidades para fortalecer el marco regulatorio y promover esta tecnología innovadora.

5.1 Ley 19.300: Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente.

La Ley 19.300 establece un marco general para la protección del medio ambiente en el país. Su principal objetivo es garantizar el derecho de las personas a vivir en un entorno limpio y saludable, además de fomentar la protección de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental.

Los principales aspectos de la ley 19.300 son los siguientes:

- **Derecho a un medio ambiente sano:** Reconoce el derecho fundamental de las personas a vivir en un entorno libre de contaminación.
- **Prevención de la contaminación:** Promueve medidas preventivas para evitar la contaminación del aire, agua y suelo.
- **Evaluación de impacto ambiental:** Exige la realización de evaluaciones de impacto ambiental para proyectos que puedan afectar significativamente el medio ambiente.
- **Participación ciudadana:** Fomenta la participación de la ciudadanía en la toma de decisiones sobre asuntos ambientales.
- **Responsabilidad ambiental:** Establece la responsabilidad de las personas naturales y jurídicas por los daños ambientales que causen.

La crianza de tenebrios para biodegradar plástico representa una innovación en el ámbito de la gestión de residuos y la protección del medio ambiente. Esta práctica se relaciona con la Ley 19.300 de la siguiente manera:

Fomento de la innovación: La ley chilena fomenta la búsqueda de soluciones innovadoras para los problemas ambientales. La crianza de tenebrios se enmarca dentro de esta línea, al proponer una alternativa biológica para el tratamiento de residuos plásticos.

Prevención de la contaminación: Al degradar plásticos, los tenebrios contribuyen a reducir la contaminación de suelos y aguas, cumpliendo así con uno de los objetivos fundamentales de la Ley 19.300.

Evaluación de impacto ambiental: Si la crianza de tenebrios se realiza a gran escala, podría requerir una evaluación de impacto ambiental para determinar sus posibles efectos en el medio ambiente.

Participación ciudadana: La implementación de proyectos de biodegradación de plástico utilizando tenebrios podría generar interés y participación ciudadana, promoviendo una mayor conciencia ambiental.

5.2 Ley 20.920 Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (Ley REP)

La Ley 20.920 que establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y el fomento al reciclaje o "Ley REP" sienta las bases para una economía circular en Chile, donde se busca reducir, reutilizar y reciclar los materiales en lugar de desecharlos. Esta ley, aunque no menciona específicamente la biodegradación de EPS, crea un ambiente propicio para explorar nuevas tecnologías como el uso de larvas para descomponer este tipo de plástico.

5.2.1 Responsabilidad Extendida del Productor (REP)

La REP es un enfoque innovador que responsabiliza a los productores por los impactos ambientales y sociales de sus bienes y servicios a lo largo de todo su ciclo de vida. Este concepto puede ser un catalizador para impulsar la innovación en la biodegradación de EPS, alentando a los productores a desarrollar tecnologías sostenibles como el uso de larvas. Los que demuestren compromiso con la investigación y desarrollo de estas tecnologías podrían recibir incentivos económicos o reconocimientos que los distinguen como líderes en sostenibilidad. Además, incluir metas específicas de biodegradación en los objetivos de reciclaje para el EPS permitiría evaluar y fomentar el progreso hacia una gestión más circular de este material. De esta manera, se crea un ciclo de incentivos que promueve la innovación y adopción de tecnologías de biodegradación, reduciendo el impacto ambiental del EPS y fomentando una economía más circular.

Para fomentar la innovación y adopción de tecnologías de biodegradación para el EPS, se podrían implementar diversas estrategias de incentivación, tales como:

- Subvenciones o fondos para investigación y desarrollo de tecnologías sostenibles.
- Reconocimientos o certificaciones para empresas que adopten prácticas sostenibles y reduzcan su impacto ambiental.
- Reducción de impuestos o tasas para empresas que implementen tecnologías de biodegradación y demuestren un compromiso con la sostenibilidad
- Además, se podrían establecer objetivos de reciclaje para el EPS que incluyan metas específicas relacionadas con la biodegradación, como:

- Lograr un porcentaje determinado de EPS biodegradado en un plazo establecido
- Reducir la cantidad de EPS que termina en vertederos o océanos en un porcentaje significativo
- Desarrollar nuevas tecnologías de biodegradación para EPS que sean eficientes y efectivas
- Implementar programas de recolección y tratamiento de EPS para biodegradación en una escala significativa

Estas estrategias podrían ayudar a crear un entorno propicio para la innovación y la adopción de tecnologías más sostenibles para el manejo del EPS, reduciendo así su impacto ambiental y fomentando una economía más circular. En la Figura 16 se muestra como funciona la Ley REP.

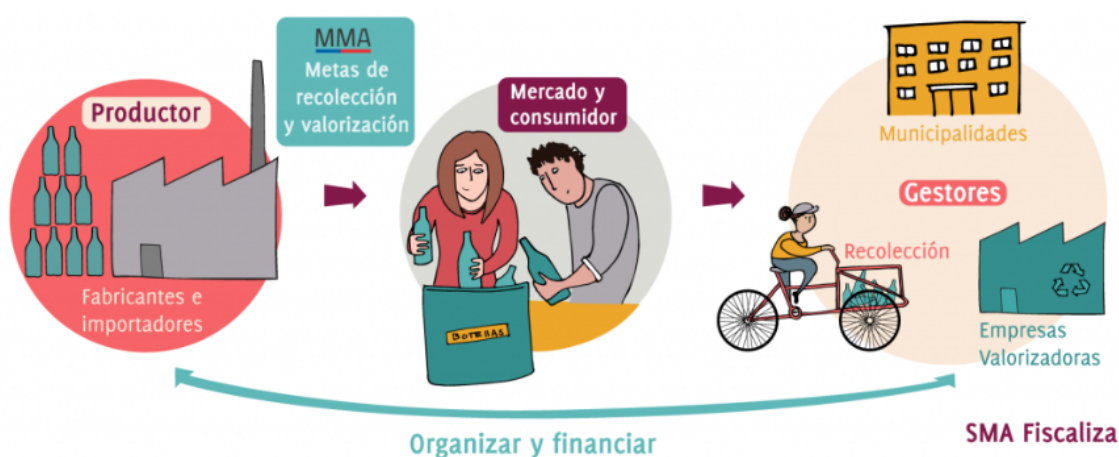


Figura 16. Funcionamiento de la Ley REP.

Fuente: Adaptado de fragmento de LEY REP ENTRA EN VIGENCIA, por Ministerio de Medio Ambiente, 2021, (<https://reciclorganicos.mma.gob.cl/ley-rep-entra-en-vigencia/>)

5.2.2 Financiamiento para Investigación y Desarrollo

La asignación de fondos para financiar proyectos de investigación enfocados en optimizar el uso de larvas para biodegradar el EPS es crucial para abordar la creciente problemática de la contaminación por este material. La biodegradación con larvas ofrece una solución innovadora y sostenible, pero requiere una investigación exhaustiva para superar los desafíos técnicos, económicos y ambientales.

Los aspectos a considerar en la investigación incluyen:

- **Eficiencia:** Mejorar la tasa de biodegradación y reducir el tiempo necesario para degradar el EPS, explorando técnicas como la selección de larvas específicas o la optimización de condiciones ambientales.
- **Escala:** Desarrollar métodos para aplicar la biodegradación con larvas a gran escala, diseñando reactores y procesos que permitan procesar grandes cantidades de EPS de manera eficiente y sostenible.
- **Impactos ambientales:** Evaluar y minimizar los impactos ambientales de la biodegradación con larvas, considerando el uso de recursos, la generación de residuos, la emisión de gases de efecto invernadero y el impacto en la biodiversidad.
- **Viabilidad económica:** Analizar la viabilidad económica de la biodegradación con larvas, incluyendo los costos de implementación, mantenimiento, y comparándolos con métodos tradicionales de gestión de residuos.
- **Aplicaciones prácticas:** Desarrollar aplicaciones prácticas para la biodegradación con larvas, como la creación de plantas de tratamiento modulares, la integración con sistemas de gestión de residuos existentes, y la generación de productos derivados valiosos.

Al financiar estos proyectos de investigación, el estado o privados pueden acelerar el desarrollo de tecnologías sostenibles para la biodegradación de EPS, reducir el impacto ambiental de este material, y promover una economía circular más resiliente.

5.3 Ley 21.368: Ley de Plásticos y Productos de un Solo Uso.

La [Ley 21.368](#) regula el uso de plásticos de un solo uso y botellas plásticas, con el objetivo de proteger el medio ambiente y reducir la generación de residuos. Según el Artículo 1° de la ley, se busca lograr esto a través de la limitación de la entrega de productos de un solo uso en establecimientos de alimentos, el fomento de la reutilización y la certificación de plásticos de un solo uso, y la regulación de botellas plásticas desechables. El EPS es uno de los elementos clave en esta investigación. Desde la promulgación de la ley, Chile ha implementado iniciativas para transformar la relación con los plásticos, siguiendo los siguientes ejes:

- Reducción del uso de plásticos de un solo uso
- Fomento de la reutilización y el reciclaje
- Certificación y regulación de plásticos sostenibles

- Educación y conciencia ambiental

Estos esfuerzos buscan minimizar el impacto ambiental de los plásticos y promover una economía circular más sostenible.

5.4 Riesgos biológicos en la interacción con material vivo

La interacción con material biológico vivo implica riesgos biológicos, definidos por [Cerdea et al. \(2014\)](#) como la exposición a agentes vivos o sus derivados que pueden originar infecciones o afecciones en el ser humano y que además pueden perjudicar a los asuntos operacionales de los procesos a diseñar. Esto significa que existe un riesgo potencial cuando un individuo entra en contacto con un organismo, lo que puede generar una variedad de efectos adversos para la salud del individuo o para los otros elementos biológicos del proceso.

Estos agentes incluyen una amplia variedad de microorganismos que pueden representar un peligro para la salud humana. Sin embargo, según [Cerdea et al. \(2014\)](#), el riesgo biológico es inevitable en ciertas situaciones, ya que el trabajo con organismos vivos es fundamental en determinados contextos, como en laboratorios o experimentos científicos, donde la manipulación intencional de microorganismos es necesaria para avanzar en el conocimiento y el desarrollo de nuevas tecnologías.

Es crucial analizar exhaustivamente los métodos de trabajo para identificar todas las posibles vías de transmisión de riesgos biológicos, con el fin de implementar medidas efectivas para mitigarlos. Al evaluar los riesgos biológicos asociados a agentes vivos, es importante considerar los siguientes aspectos:

- Picaduras y mordeduras de organismos.
- Infecciones agudas y crónicas causadas por microorganismos, incluyendo virus, bacterias y formas intermedias.
- Enfermedades producidas por hongos.
- Infecciones causadas por parásitos microscópicos (protozoos) y macroscópicos (helmintos y artrópodos).

Otro riesgo importante a considerar en esta investigación es la posibilidad de reacciones alérgicas causadas por sustancias de origen vegetal o animal, como polvo de cabellos, polen, esporas de hongos, partes de insectos, entre otros. Estas sustancias pueden ser

liberadas al medio ambiente y causar reacciones adversas en las personas expuestas. Según [Cerdea et al. \(2014\)](#), los agentes biológicos están clasificados en cuatro grupos de riesgo en el [Real Decreto 664/1997 de España](#), siendo el grupo 1 el de menor riesgo y el grupo 4 el de mayor riesgo. En este caso, el insecto del grupo coleóptero que se pretende estudiar se clasifica en el grupo 1, ya que es poco probable que cause enfermedades en humanos ([Cerdea et al., 2014](#)). En cuanto a la legislación chilena, los agentes biológicos están mencionados en el [Decreto Supremo N° 109, Artículo 18, de 1968](#), como agentes que pueden causar enfermedades profesionales. Es importante considerar estas regulaciones y tomar medidas de seguridad adecuadas para minimizar los riesgos asociados con el manejo de agentes biológicos.

5.5 Ley 20.417: Ley que crea el Ministerio del Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente.

La Ley 20.417 de Chile representa un hito en la legislación ambiental del país, estableciendo un marco regulatorio sólido y moderno para la gestión ambiental. Esta ley, promulgada en 2010, tiene como objetivo principal fortalecer la institucionalidad ambiental, promover la participación ciudadana y garantizar la protección del medio ambiente. Esta ley establece la creación de instituciones como el Ministerio del Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), otorgándoles funciones específicas en materia de evaluación, supervisión y fiscalización ambiental.

Introduce el concepto de Evaluación Ambiental Estratégica (EAE), obligando a evaluar los impactos ambientales de políticas, planes y programas de carácter general, fortalece los mecanismos de participación ciudadana en los procesos de toma de decisiones ambientales, también regula los procedimientos para la obtención de permisos ambientales sectoriales y regionales y finalmente establece un sistema de sanciones administrativas y penales para quienes infrinjan la normativa ambiental.

La crianza de tenebrios como una alternativa para la gestión de residuos plásticos, si bien no está explícitamente mencionada en la Ley 20.417, se relaciona con ella de manera indirecta y potencialmente significativa como. Algunas conexiones claves son:

Fomento a la innovación: La ley promueve la búsqueda de soluciones innovadoras para la gestión ambiental. La crianza de tenebrios se enmarca en esta línea, al proponer una tecnología biológica para abordar el problema de la contaminación por plásticos.

Economía circular: La ley busca fomentar la economía circular, es decir, un modelo económico que busca reducir al mínimo la generación de residuos, mantener los productos y materiales en uso el mayor tiempo posible, y recuperar y regenerar los materiales al final de su vida útil. La biodegradación del plástico por tenebrios se alinea con este principio.

Evaluación ambiental: Cualquier iniciativa a gran escala relacionada con la crianza de tenebrios y la gestión de residuos plásticos estaría sujeta a una evaluación ambiental, ya sea a través de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), según corresponda.

Permisos ambientales: Las instalaciones destinadas a la crianza de tenebrios y el tratamiento de residuos plásticos requerirían de los permisos ambientales correspondientes, emitidos por el SEA.

Supervisión y fiscalización: La SMA sería la encargada de supervisar y fiscalizar el cumplimiento de la normativa ambiental por parte de las empresas o proyectos relacionados con la crianza de tenebrios.

En conclusión, la Ley 20.417 proporciona un marco legal sólido para la gestión ambiental en Chile, y la crianza de tenebrios representa una oportunidad para innovar en este ámbito. Sin embargo, es fundamental contar con un marco regulatorio adecuado y realizar investigaciones exhaustivas para garantizar que esta práctica sea segura, eficiente y sostenible a largo plazo.

5.6 Decreto Supremo 148/2003: Reglamento para la Gestión de Residuos Peligrosos.

El Decreto Supremo 148/2003 establece un marco regulatorio específico para la gestión de residuos peligrosos. Este reglamento busca proteger la salud humana y el medio ambiente, estableciendo normas y procedimientos para la generación, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de este tipo de residuos.

Los principales aspectos que regula este decreto son:

Definición de residuo peligroso: Establece criterios claros para identificar qué sustancias o productos se consideran residuos peligrosos, considerando sus características corrosivas, reactivas, tóxicas, inflamables o patogénicas.

Generación y almacenamiento: Regula las obligaciones de los generadores de residuos peligrosos, como la identificación, rotulación y almacenamiento adecuado de estos residuos.

Transporte: Establece normas para el transporte seguro de residuos peligrosos, incluyendo requisitos para los vehículos, embalajes y documentación.

Tratamiento y disposición final: Define los métodos de tratamiento y disposición final permitidos para los residuos peligrosos, priorizando aquellos que minimicen los riesgos para la salud y el medio ambiente.

Manifestación: Exige la elaboración de una manifestación de residuos peligrosos, que debe acompañar al residuo durante todo su ciclo de vida.

La crianza de tenebrios para la biodegradación de plásticos es una práctica emergente que presenta un interesante desafío en el contexto del Decreto Supremo 148/2003. Algunos aspectos a considerar son:

Clasificación de los residuos plásticos: No todos los plásticos son considerados residuos peligrosos. La clasificación dependerá de su composición química y de si presentan alguna de las características que definen a un residuo peligroso (toxicidad, inflamabilidad, etc.).

Productos de la biodegradación: Los productos resultantes de la biodegradación del plástico por parte de los tenebrios deben ser evaluados para determinar si se clasifican como residuos peligrosos.

Proceso de biodegradación: El proceso de biodegradación en sí mismo debe ser controlado y monitoreado para garantizar que no genere nuevos residuos peligrosos o contaminantes.

Normativa aplicable: Además del Decreto Supremo 148/2003, podrían ser aplicables otras normas ambientales, como aquellas relacionadas con la producción de alimentos (si los tenebrios son destinados a la alimentación animal) o con la gestión de residuos orgánicos.

5.7 Decreto Supremo 189/2005: Reglamento para la Gestión de Residuos Sólidos Municipales.

El Decreto Supremo 189/2005 constituye un pilar fundamental en la regulación de la gestión de residuos sólidos en Chile. Este reglamento establece las condiciones sanitarias y de seguridad básicas que deben cumplir los rellenos sanitarios, los cuales son el destino final de muchos residuos.

Principales puntos del decreto:

Condiciones sanitarias: Define las normas para asegurar que los rellenos sanitarios no contaminen fuentes de agua ni el aire, y que se manejen de forma segura para evitar riesgos a la salud pública.

Seguridad: Establece medidas para prevenir incendios, explosiones y otros riesgos asociados a la disposición final de residuos.

Monitoreo: Exige un monitoreo constante de las condiciones del relleno sanitario, incluyendo la calidad del suelo y del agua subterránea.

Cierre y post-cierre: Regula los procedimientos para el cierre de un relleno sanitario y las medidas de cuidado posteriores para evitar problemas ambientales.

Este decreto, en conjunto con la Ley 20.417, establece un marco normativo que busca promover una gestión de residuos más sostenible y responsable.

La crianza de tenebrios para biodegradar plástico presenta un gran potencial como una herramienta complementaria para la gestión de residuos en Chile. Sin embargo, es necesario desarrollar un marco regulatorio adecuado y realizar más investigaciones para aprovechar al máximo sus beneficios y garantizar su sostenibilidad.

5.8 Decreto Supremo 40/2012: Reglamento para la Gestión de Residuos Líquidos Industriales.

El Decreto Supremo 40/2012 establece un marco normativo específico para la gestión de los residuos líquidos industriales. Este reglamento, enmarcado en la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, busca regular la generación, almacenamiento, tratamiento y disposición final de estos residuos, con el fin de prevenir y minimizar los impactos ambientales que puedan causar.

Principales aspectos del reglamento:

Definición de residuos líquidos industriales: Establece una clara definición de qué se considera un residuo líquido industrial, considerando su origen y características.

Obligaciones de los generadores: Impone a los generadores de estos residuos la obligación de caracterizarlos, almacenarlos de manera adecuada y tratarlos antes de su disposición final.

Tratamiento de los residuos: Establece los estándares y requisitos para el tratamiento de los residuos líquidos industriales, priorizando aquellos métodos que permitan su reutilización o valorización.

Disposición final: Regula la disposición final de los residuos líquidos industriales, estableciendo los requisitos para los sitios de disposición y los procedimientos a seguir.

Control y seguimiento: Establece un sistema de control y seguimiento para garantizar el cumplimiento de las disposiciones del reglamento.

5.9 Experimentación con organismos vivos

La experimentación con organismos vivos es un tema complejo que abarca diversas disciplinas, como la biología, la medicina, la ética y el derecho. La investigación científica con organismos vivos puede tener diferentes objetivos, como el desarrollo de nuevos medicamentos o tratamientos, la comprensión de mecanismos biológicos, la conservación de especies y la educación. Sin embargo, también plantea cuestiones éticas importantes, como el respeto por la vida y el bienestar de los seres vivos, la minimización del sufrimiento y el dolor, y la consideración de los intereses y necesidades de los organismos.

La legislación y regulaciones en este campo buscan equilibrar el avance científico con la protección de los organismos vivos, estableciendo disposiciones para garantizar su bienestar y seguridad. La bioseguridad es otro aspecto crucial, ya que la experimentación con organismos vivos puede implicar riesgos para los investigadores, el público y el medio ambiente. En algunos casos, es posible utilizar alternativas a la experimentación con organismos vivos, como la simulación por computador o el uso de cultivos celulares, lo que puede reducir el impacto ético y ambiental.

La experimentación con organismos vivos, específicamente con animales, tiene como objetivo principal dilucidar y comprender los fenómenos biológicos de las especies animales, según [Boada et al. \(2011\)](#). Sin embargo, también incluye cualquier actividad científica o experimental que implique una intervención en el estado del animal, lo que podría causarle dolor o sufrimiento. Aunque las campañas de concienciación han logrado un impacto positivo en la reflexión sobre el uso de animales en investigación, se ha

centrado principalmente en los vertebrados, dejando un vacío en la consideración de otros organismos vivos.

La [Ley N° 20.380](#), también conocida como "[Ley de Protección de Animales](#)", tiene como objetivo velar por el bienestar de los animales utilizados en la investigación y las intervenciones en su ambiente natural. Esta ley establece disposiciones para garantizar la protección y bienestar de los animales, considerándolos seres vivos y parte de la naturaleza, con el fin de proporcionarles un trato adecuado y evitarles sufrimiento innecesario. Los tópicos regulados por esta ley se centran en la educación para el respeto y protección de los animales vertebrados. Además, es fundamental que la utilización de organismos en la investigación cumpla con normas de bioseguridad para proteger a los organismos y realizar prácticas favorables.

Si bien la autorización de la FDA para el uso de insectos en la alimentación humana y animal aún presenta ciertas lagunas regulatorias, la creciente investigación sobre la capacidad de las larvas de tenebrio molitor para consumir y descomponer poliestireno expandido (EPS) representa una innovación prometedora en el campo de la gestión de residuos. Aunque no existe una regulación específica que permita el uso directo de larvas de tenebrios en la cadena alimentaria humana, numerosos estudios ([Van Huis, A., 2013](#)) han demostrado su seguridad como alimento para aves y peces. Extrapolando estos hallazgos, se puede argumentar que el uso de larvas de tenebrio en procesos de biodegradación de EPS, y potencialmente en la producción de subproductos para alimentación animal, se alinea con las tendencias actuales hacia la sostenibilidad y la circularidad en la producción de alimentos.

CAPÍTULO 6: CLASIFICACIÓN DE PROCESOS Y BALANCE DE MASA

En este capítulo se presentan brevemente los distintos tipos y configuraciones de las etapas que pueden conformar un proceso de reducción de residuos, las cuales serán consideradas opcionales dentro de la metodología de diseño, pero serán acotadas de acuerdo a criterios dentro de la misma metodología propuesta.

6.1 Definición de proceso

Los procesos en la industria son una secuencia de operaciones unitarias que transforman materias primas en productos finales. Aunque se busca optimizar estos procesos para minimizar la generación de residuos, es inevitable que se produzcan ciertos subproductos.

Comprender las operaciones unitarias es fundamental para diseñar y mejorar los procesos industriales, así como para desarrollar tecnologías más sostenibles (McCabe, 2005). Dichas operaciones pueden incluir reacciones químicas, separación de componentes, transferencia de calor y masa, entre otras. Un proceso puede ser representado visualmente en diagramas de flujo, que se destacan por incluir corrientes de entrada y salida desde y hacia las etapas (o sub procesos) que componen el proceso completo. La Figura 17 muestra el diagrama general de un proceso completo, el cual, a su vez, puede estar compuestos por sub-procesos internos que también tendrán entradas y salidas.

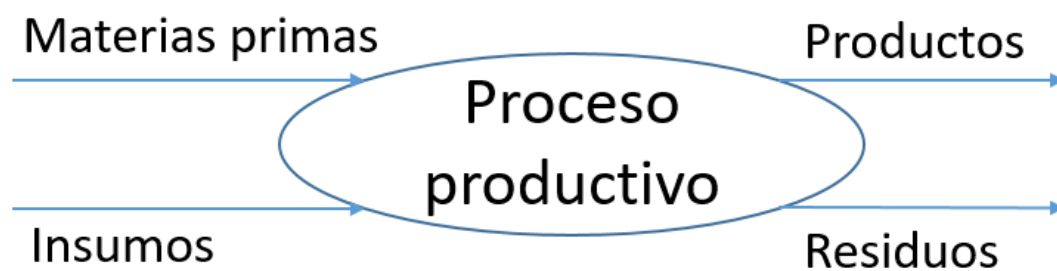


Figura 17. Diagrama que representa un proceso productivo.

Fuente: Elaboración propia.

En el contexto del tratamiento de residuos, un proceso implica una serie de etapas para manejar y reducir los desechos de manera segura y eficiente. Esto puede incluir la clasificación, reciclaje, tratamiento químico o biológico, y la disposición final de los residuos, todo esto con el objetivo de minimizar el impacto ambiental y recuperar materiales valiosos cuando sea posible.

En resumen, un proceso se define como un conjunto de etapas a las cuales entran ciertas sustancias y energía (materias primas e insumos), para después salir sustancias y/o energía distintas a las de entrada (productos y residuos), a través de uno o más procesos de transformación y transferencia.

6.2 Tipos de procesos según continuidad

Según el criterio de continuidad de los flujos de entrada y salida hacia y desde las etapas de un proceso, estos son clasificados como sigue (Rojas, 2012 y Felder, 2004):

a) Procesos por lotes (Batch): En estos procesos, las operaciones se realizan en etapas discretas, es decir, se carga una cantidad específica de materia prima y/o insumos, se procesa y se descarga el producto final antes de comenzar un nuevo ciclo. Son ideales para la producción de pequeñas cantidades y productos variados. Esta definición se puede aplicar a una etapa o sub-proceso (que por definición también es un proceso) o para uno completo (conformado por más de una etapa).

b) Procesos continuos: Aquí, las materias primas se alimentan y los productos se retiran de manera continua. Estos procesos son eficientes para la producción a gran escala y permiten un control más uniforme de las condiciones de operación.

c) Procesos semi-continuos: Combinan características de los procesos por lotes y continuos. Algunas etapas del proceso pueden ser continuas mientras que otras se realizan por lotes. Son útiles cuando se necesita flexibilidad en la producción.

Dadas las características propias de las sustancias y organismos involucrados (es decir, la tasa de consumo diario de material, por cada especie larvaria y el carguío de este material a cada etapa o salida, según el modelo del procedimiento experimental), en la metodología se modelará en proceso como semi-continuo. Técnicamente, debería considerarse estrictamente discontinuo, pero, en el escenario en el cual se considere una extensión de tiempo mayor para la simulación (un semestre o un año, por ejemplo), las cantidades de flujo podrían, por ejemplo, representarse en unidades como kg/año, o similares. De esta manera, en el cálculo de procesos se podrían tratar las cantidades como si fueran flujos “continuos”.

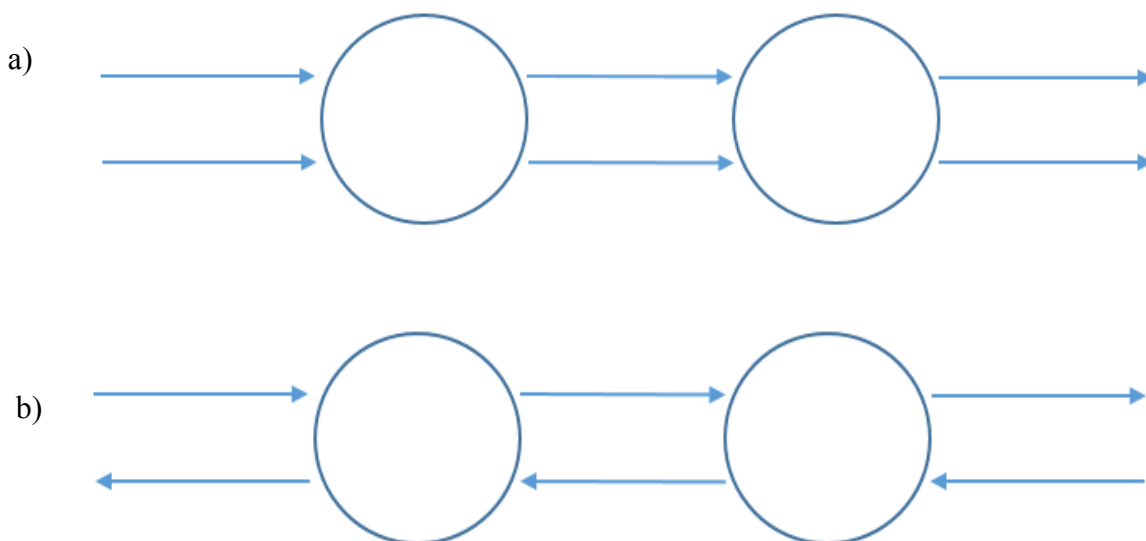
Sea cual sea el tipo de continuidad o discontinuidad de los flujos que participan en el proceso de reducción, la configuración y cantidad de los flujos que ingresan y salen hacia o desde cada una de las etapas del mismo pueden ser seleccionadas de manera independiente y solo después se establecerán los criterios que pudieran restringir dichas opciones. En la siguiente sección se explica la configuración que pueden tener dichos flujos en un proceso determinado.

6.3 Configuración de flujos

Además de la clasificación de procesos según la sección 6.2, se tiene la siguiente, basada en la configuración de etapas y dirección de flujos (Treybal, 1998):

- a) **Procesos en paralelo:** En esta configuración, varias corrientes de proceso se manejan simultáneamente en diferentes unidades operativas, tal como se muestra en la [Figura 18.a](#), ejemplificado en un proceso de 2 etapas.
- b) **Procesos en contracorriente:** En esta configuración, las corrientes de entrada y salida fluyen en sentidos opuestos, tal como se observa en la [Figura 18.b](#), ejemplificado en un proceso de 2 etapas.
- c) **Procesos de flujo cruzado:** Aquí, hay una serie de corrientes que pasan a través de todas las etapas, continuando con el proceso de manera serial hacia cada una, y hay otras corrientes que solo entran y salen hacia y desde cada una de dichas etapas. Esto está representado en la [Figura 18.c](#), ejemplificado en un proceso de 2 etapas.

La diferencia cuantitativa entre estas configuraciones dependerá de las características del proceso particular que se lleve a cabo en cada una de las etapas (fenómenos químicos, biológicos, físicos o una combinación de más de uno de ellos) y de las cantidades de entrada y de salida que generen, además del tiempo de residencia de los componentes de entrada, productos y salidas, además de la cinética de producción y consumo de especies químicas y biológicas.



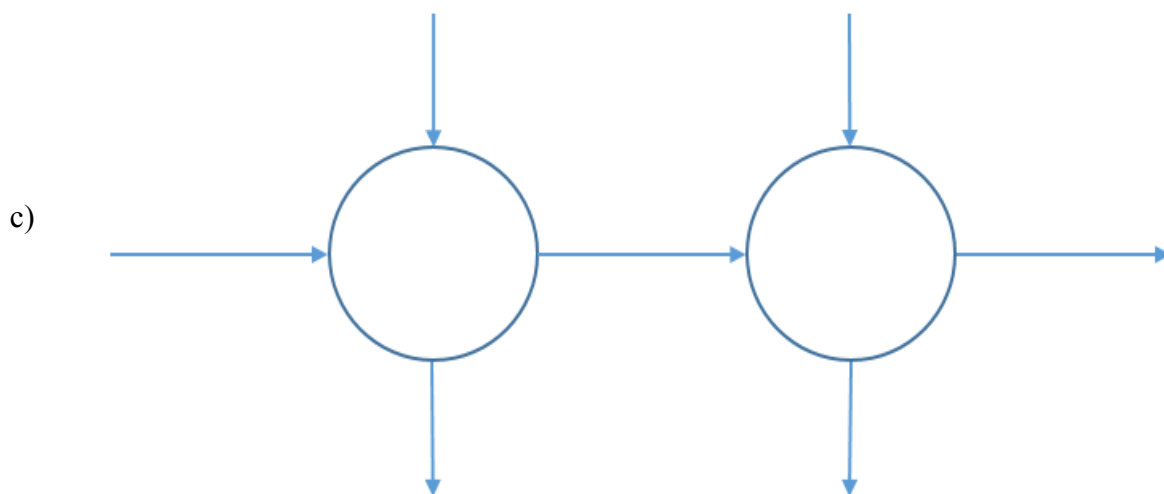


Figura 18. Principales configuraciones de flujo en procesos, donde los círculos representan etapas y las flechas representan corrientes. **a)** Flujo en paralelo, **b)** Flujo en contracorriente y **c)** Flujo cruzado.

Fuente: Elaboración propia.

6.4 Consideraciones importantes para el desarrollo de la metodología

Los antecedentes e información presentados anteriormente se vinculan en la metodología según los siguientes lineamientos:

- El proceso que se considera en este trabajo se clasifica principalmente como un proceso discontinuo o semi-continuo. Sin embargo, la proyección de la metodología, desde el punto de vista que se considere eventualmente para flujos de residuos mensuales, trimestrales, semestrales o incluso anuales, indica que es posible que se pueda modelar como un proceso continuo de manera anual, con las discontinuidades inevitables de tiempos de simulación inferiores al año. Sin embargo, la metodología de cálculo considerará un tiempo (de dicha simulación) en el cual las etapas del proceso se activan de manera discontinua.
- En el caso del tratamiento de residuos como los que considera este estudio, generalmente son tratados mediante procesos de separación, que, tal como su

nombre lo indica, son aquellos destinados a separar residuos, ya sea a través de procesos físicos, químicos o fisicoquímicos, o biológicos o una mezcla de ellos, utilizando la diferencia de propiedades y/o la capacidad y selectividad de consumo de las especies químicas o biológicas que se utilicen.

- El consumo de uno o más tipos de residuos durante el proceso también se considera un proceso de separación, dado que lo que se consume se está separando del resto y sufre una transformación química, física, biológica y/o térmica.
- En el caso del consumo de residuos biodegradables y poliestireno expandido (denominados RBD y EPS, en este trabajo, respectivamente), las distintas especies de larvas tendrán una tasa de consumo diario estimado por cada especie larvaria, la que es determinada en la parte experimental de esta investigación (Capítulo 4 de este informe). Dadas las dimensiones de dicha tasa de consumo (masa consumida / unidad de tiempo / espécimen), es posible utilizar una metodología de cálculo de procesos continuos que es más realista cuando se trata de tiempos de simulación semestrales o anuales. Por el mismo motivo, y para mayor claridad, las pruebas se centrarán en un lapso de tiempo relativamente corto (máximo 2 meses, que es el tiempo estimado de limpieza de cada recipiente en donde ocurre la etapa de consumo de EPS).
- Hasta el momento no queda claro el grado real de transformación (bio)química que sucede con el poliestireno al interior del tracto digestivo, dado que existen análisis y observaciones disímiles en cuanto al consumo másico de dicho compuesto químico ([Albarracín & Clavijo, 2021](#); [Daviran, 2017](#); [Gómez y Sáiz, 2013](#); [Wang, Y., & Shelomi, M., 2015](#); [Yang et al 2020b, 2015a, 2015b](#)), lo que sí es posible asegurar es que ocurre, al menos, una disminución volumétrica del poliestireno expandido, lo que también se puede considerar una forma de reducción (desde el punto de vista de un relleno sanitario). De todas maneras, el proceso de digestión en donde se combinan distintas dietas (restos de verduras, frutas o similares) con los respectivos grados de humedad y actividad microbiana (entre las que participa la microbiota del tracto digestivo de las larvas, ([Albarracín & Clavijo, 2021](#); [Park et al., 2013](#); [Wang, Y., & Shelomi, M., 2015](#)), hace suponer con bastantes motivos que los restos fecales de dichos residuos están, al menos, acondicionados para una más rápida degradación. Sin embargo, dado que el alcance del proyecto en el cual se encuentra enmarcado este estudio no considera el análisis químico de estos residuos (por temas de costo), la caracterización de residuos es aproximada y solo

considera supuestos en el balance de masa (ver dónde meter esos supuestos, es decir,).

- Con respecto a la continuidad del proceso, en la metodología, esta dependerá del tiempo a cubrir en la simulación. Si es un tiempo relativamente pequeño (inferior a 6 meses), se opta por el proceso tipo Batch y si se opta por tiempos relativamente grandes (un año o más), se podría representar dicho proceso como uno continuo.
- Con respecto a la dirección y sentido de los flujos, se debe considerar el criterio de minimización de residuos y de huella de carbono para el tiempo de simulación.

6.5 Criterios para seleccionar el tipo de proceso según flujo

Uno de los objetivos principales del diseño de proceso de tratamiento de residuos es lograr la minimización de los mismos para su disposición final, aprovechamiento de energía, entre otros ([RECYTRANS, 2014](#)) En el primero mencionado se encuentra la huella de carbono, expresada en masa de CO₂ equivalente.

Considerando este aspecto, entre otros relacionados, en esta metodología propuesta se establecen los siguientes criterios para la selección del tipo de flujo, con su aplicación directa al caso de estudio:

1. Minimización de etapas para cada especie larvaria utilizada.

Su aplicación indica que el caso de estudio será de 1 etapa para la especie *Zophobas morio* y 1 etapa para la especie *Tenebrio molitor*.

2. Simplificación del proceso con respecto al residuo.

Esta simplificación hace referencia al sentido de las corrientes intermedias de residuo, en vías de obtener mayor probabilidad de disminuir la cantidad de residuo.

La diferencia entre esta simplificación y una minimización total en términos cuantitativos es que esta última dependerá principalmente de las cantidades de residuo de entrada, la cantidad de especies reductoras (en este caso, larvas), el tiempo de degradación, el tiempo de residencia, entre otros factores.

En este caso, se ha utilizado la siguiente nomenclatura: E_1 = Etapa 1; E_2 = Etapa 2; $EPS_{0,1}$ = Entrada de EPS en E_1 ; $EPS_{1,2}$ = Entrada de EPS en E_2 ; $EPS_{2,s}$ = Salida de EPS en E_2 ; $RBD_{0,1}$ = Entrada de RBD en E_1 ; $RBD_{1,s}$ = Salida de RBD en E_1 ; $RBD_{0,2}$ = Entrada de RBD en E_2 ; $RBD_{2,s}$ = Salida de RBD en E_2

En la [Figura 19](#) se muestra una configuración de flujo cruzado de dos etapas, la unión física entre la salida de EPS de la etapa 1 con la entrada a la etapa 2 da como resultado una igualación de estas corrientes.

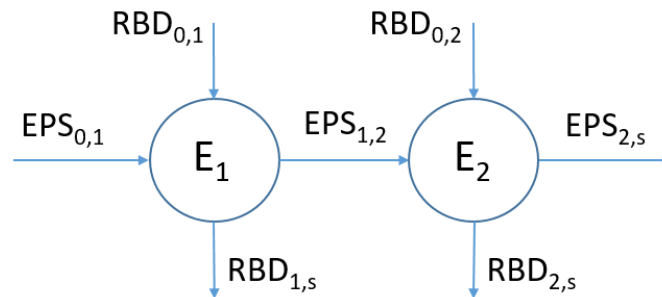


Figura 19. Configuración de flujo cruzado a considerar.

Fuente: Elaboración propia.

3. Ubicación de especies larvarias en cada etapa

Los pre-experimentos han mostrado ciertas diferencias en las características y consecuencias del consumo de EPS (poliestireno expandido) y RBD (residuos biodegradables) en ambas especies. Estas diferencias son, por ejemplo, el tamaño de los agujeros y túneles, además de las cantidades propias de consumo calórico de cada especie. A pesar de eso, se ha observado que las larvas de una especie no presentan inconvenientes observables (a nivel macro) en consumir los residuos de plumavit que ha dejado la otra especie.

Frente a esto, se ha optado por dejar libre la elección en el orden en que se presentan las especies en las diversas etapas que componen el proceso de reducción de residuos.

De esta manera, para el caso de estudio se establece que las larvas de *Tenebrio molitor* estén presentes en la etapa 1 y en la etapa 2, las larvas de *Zophobas morio*.

4. Selección del tipo de residuo en la corriente que continúa de una etapa a otra

Este criterio es aplicado para la configuración de flujo cruzado, en este caso se debería considerar el tiempo de degradación propia de cada residuo. El EPS, por tener un mayor tiempo de degradación, debería ser el componente de la corriente que entra a la primera etapa y luego pase a la segunda y posteriores, mientras que el RBD debería estar presente en los flujos que se alimenten y salgan directamente de cada etapa.

Finalmente, el número de etapas requerido dependerá de las cantidades de residuos, de larvas y tiempo estimado o establecido para cada una de ellas.

5. Tiempo de descomposición

La temperatura influye significativamente en la velocidad de descomposición de los residuos orgánicos, lo que a su vez determina la disponibilidad de nutrientes para las larvas de tenebrios. Según Gomez, 2022, "un aumento de 10°C puede duplicar o triplicar la tasa de descomposición". A temperaturas óptimas, los residuos orgánicos se descomponen más rápidamente, liberando una mayor cantidad de nutrientes en un período de tiempo más corto. Sin embargo, es importante considerar que un tiempo de descomposición excesivamente rápido puede resultar en una pérdida de nutrientes por volatilización o lixiviación. Por otro lado, una descomposición lenta puede limitar la disponibilidad de alimento para las larvas y reducir su tasa de crecimiento. Por lo tanto, encontrar el equilibrio adecuado entre la temperatura y el tiempo de descomposición es crucial para optimizar la producción de biomasa de tenebrios.

6. Aspectos operacionales

Es fundamental garantizar la calidad del sustrato para optimizar el desarrollo de las larvas de tenebrios. La presencia de residuos como restos de RBD secos o en avanzado estado de descomposición, así como harina con exceso de humedad o contaminada con exuvias (exoesqueleto que dejan los artrópodos, como insectos, crustáceos o arácnidos, después de mudar de piel) y fecas, con el fin de inhibir el desarrollo de patógenos, perjudicando así la salud y el crecimiento de las larvas.

7. Otras consideraciones adicionales

Teniendo en cuenta que interactúan diversos factores en un proceso de este tipo (por ejemplo, físicos, biológicos, químicos, fisicoquímicos y térmicos), esta nueva metodología propuesta considera las posibilidades de mejoramiento en dicho sentido, dado que generalmente se presentan límites naturales que deben ser considerados.

Dentro de estos límites estará el espacio disponible, la cantidad y tipo de labores, la cantidad de personal que las lleve a cabo, los tiempos del ciclo de vida en función de la temperatura, fenómenos de absorción y desorción de humedad, entre otros.

6.6 Balance de masa

Un balance de masa es una herramienta fundamental en ingeniería y ciencias aplicadas para mantener el control sobre los procesos que involucran la transferencia y transformación de materia. En esencia, se trata de aplicar el principio de conservación de la materia.

Para realizar un balance de masa, se sigue este enfoque básico ([Moran, 2015](#)):

- Identificación del sistema: Definir los límites del sistema que estás analizando. Puede ser una pieza de equipo, un proceso o una planta completa.
- Entradas y salidas: Identificar todas las entradas y salidas de masa del sistema. Las entradas podrían incluir materias primas y reactivos, mientras que las salidas pueden ser productos, subproductos y residuos.
- Acumulación: Determinar si hay acumulación de masa en el sistema. Esto se da cuando la cantidad de masa dentro del sistema cambia con el tiempo, como en un tanque de almacenamiento.
- Reacciones químicas: Si ocurre alguna reacción química, debes considerar la conversión de reactivos a productos.

El balance de masa general se expresa como:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} + \text{Generación} - \text{Consumo} = \text{Acumulación}$$

Este enfoque asegura que todas las masas involucradas se contabilicen y puedan ser rastreadas a lo largo del proceso, permitiendo la optimización y control eficientes Himmelblau, (1989).

CAPÍTULO 7: METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN PROCESO DE REDUCCIÓN DE EPS UTILIZANDO LARVAS DE *ZOPHOBAS MORIO* Y *TENEBRIO MOLITOR*.

En este capítulo se establecen los fundamentos de la metodología para diseñar un proceso de reducción de EPS utilizando larvas de *Zophobas morio* y *Tenebrio molitor*.

Dado que este trabajo se centra en el desarrollo de una metodología, lo que se presenta aquí es una primera aproximación que servirá como base para futuras investigaciones y mejoras progresivas. Se espera que esta metodología sea adaptable y escalable, permitiendo su implementación en diferentes contextos y escalas.

La metodología presentada en este trabajo se estructura en torno a los siguientes aspectos:

7.1 Cumplimiento del marco legal

La presente metodología se ajusta a las normativas y regulaciones nacionales e internacionales aplicables a la reducción de residuos orgánicos utilizando larvas de insectos. A continuación, se presentan los aspectos normativos y legales que se han tenido en cuenta:

- Normas de Bioseguridad: se han seguido las normas y protocolos establecidos para garantizar la bioseguridad en el manejo de larvas de insectos y residuos orgánicos. La implementación de estas normas y protocolos es crucial para prevenir la exposición a patógenos y otros agentes biológicos peligrosos. ([Organización Mundial de la Salud, 2018](#)).
- Normas de emisiones: se han cumplido las normas y regulaciones internacionales y nacionales aplicables a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes atmosféricos, con el fin de minimizar el impacto ambiental de la actividad. En particular, se han seguido las directrices establecidas en el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) de 2001, que establece límites y regulaciones para la emisión de sustancias químicas peligrosas.
- Ley de Uso de Animales: la producción de larvas de *Zophobas Morio* y *Tenebrio Molitor* para fines de investigación y desarrollo debe cumplir con las normas y regulaciones establecidas en la [Ley de Protección Animal \(2006\)](#). Esta ley establece los principios y normas para el uso de animales en investigación y desarrollo, con el fin de garantizar su bienestar y minimizar su sufrimiento.

7.2 Consideración de datos e información de laboratorio (etapa previa)

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos en la etapa previa de laboratorio, que sirven como base para el desarrollo de la metodología. Se han tomado como referencia los experimentos realizados en el Capítulo 4: Metodología Experimental, donde se evaluó el consumo de EPS por parte de las larvas de *Zophobas morio*.

Además, se han considerado las publicaciones de [Albarracín \(2021\)](#) y [Gómez \(2022\)](#) para obtener información relevante sobre el comportamiento de las larvas de *Tenebrio molitor*

en relación con el consumo de EPS. Estos estudios proporcionan una base sólida para entender sus necesidades y características.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados:

a) Valores estimados de consumo de EPS

Se han estimado las tasas de consumo de EPS para cada especie de larva. Los resultados obtenidos son:

- Tasa de consumo EPS de *Zophobas morio*: 0,012 g EPS/día/larva
- Tasa de consumo EPS de *Tenebrio molitor*: 0,0008 g EPS/día/larva

Estos resultados indican que las larvas de *Zophobas morio* tienen una tasa de consumo de EPS significativamente mayor que las larvas de *Tenebrio molitor*.

b) Observaciones y medidas repelentes

Durante los experimentos, se observó que la presencia de ácaros en los recipientes puede afectar la salud y el bienestar de las larvas. Para abordar este problema, se implementaron medidas repelentes, incluyendo el uso de anti-ácaros. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el uso de estos productos puede generar un impacto en la huella de carbono.

Se encontró que el uso de anti-ácaros puede ser efectivo para controlar la presencia de ácaros, pero se debe aplicar de manera responsable y sostenible. Se recomienda aplicar el producto cada 4 meses en aplicaciones simples sobre los recipientes.

La etapa de experimentación de laboratorio ofrece oportunidades para mejoras y optimizaciones, particularmente en la consideración de un análisis más exhaustivo y preciso de los componentes de salida del proceso de biodegradación, así como en el control y monitoreo de las condiciones ambientales de cada colonia.

c) Operaciones y mantenimiento

Se han establecido protocolos para la alimentación, pesaje y limpieza de los recipientes. Los detalles de estos protocolos son:

- Alimentación: se proporciona una dieta adecuada para las larvas, que incluye una mezcla de harina y otros nutrientes.
- Pesaje: se pesan las larvas regularmente para monitorear su crecimiento y desarrollo.
- Limpieza de recipientes: se limpian los recipientes cada 2 meses, reemplazando el sustrato (harina y/u otros) con una nueva capa de entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{3}$ del volumen interior del recipiente.

Es importante destacar que la etapa de experimentación de laboratorio puede mejorarse para obtener resultados más precisos y confiables. Algunas posibles mejoras incluyen un análisis más exacto de los componentes de salida del proceso de biodegradación y un mayor control en las condiciones de cada colonia, incluyendo la temperatura, la humedad y la iluminación.

7.3 Selección del número de etapas y diseño del proceso

La determinación del número de etapas en el proceso de biodegradación se basó en una evaluación cuidadosa de varios factores, incluyendo la disponibilidad de espacio físico, la complejidad del mantenimiento y la limpieza, y la disponibilidad de colonias de larvas.

Inicialmente, se consideró la posibilidad de mezclar especies de larvas en una misma etapa, lo que podría haber permitido una mayor eficiencia y flexibilidad en el proceso. Sin embargo, debido a las diferencias significativas en el comportamiento de las larvas de *Zophobas morio* y *Tenebrio molitor*, particularmente en términos de agresividad y tendencia al canibalismo, se decidió que el proceso contaría con dos etapas separadas por cada especie de larva.

Cada etapa contendrá una especie distinta de larva, lo que permitirá una mayor especialización y eficiencia en el proceso de biodegradación. Además, esta configuración permitirá la aplicación paralela de las etapas, lo que podría aumentar la productividad y la eficiencia del proceso.

7.4 Número de recipientes para cada etapa

Un aspecto importante en el diseño del proceso de biodegradación es la minimización de la huella de carbono, ya que la producción de residuos orgánicos y la emisión de gases de efecto invernadero son problemas ambientales significativos que requieren soluciones sostenibles.

Para lograr la minimización de la huella de carbono, es fundamental considerar factores clave como la cantidad de recipientes de polipropileno necesarios para cada etapa del proceso, el tipo de material utilizado para la fabricación de los recipientes, la eficiencia energética del proceso y la generación de residuos.

En el caso de replicar el experimento realizado con las larvas de *Zophobas morio*, se deben tener en cuenta las observaciones experimentales que indican que las colonias de larvas son propensas a plagas de ácaros, lo que puede tener un impacto significativo en la salud y el bienestar de las larvas. Esto requiere la implementación de medidas de control y prevención, como la utilización de productos químicos o biológicos para controlar las plagas de ácaros o la modificación del diseño de los recipientes para reducir la posibilidad de infestación por ácaros.

Para abordar este problema, el diseño inicial incluye un recipiente adicional para cada colonia, en el que se realiza el proceso de consumo. Sin embargo, esto duplica la huella de carbono de cada colonia en comparación con utilizar un solo recipiente. Por otro lado, se puede considerar el uso de criaderos convencionales para este tipo de animal, en los que cada etapa del proceso corresponde a un cajón.

Como se puede observar en la **Figura 20** estos cajones pueden contener también la colonia en su etapa de escarabajo, ya que estos no tienen la capacidad de volar. Esto podría ser una opción más sostenible y eficiente para el diseño del proceso de biodegradación.

Es importante destacar que la minimización de la huella de carbono es un aspecto fundamental en el diseño del proceso de biodegradación. La selección del tipo de recipiente y el diseño del proceso deben ser cuidadosamente evaluados para garantizar la sostenibilidad y la eficiencia del proceso.



Figura 20. Cajoneras usadas para la crianza de *Zophobas morio*.

Fuente: La Razón

7.5 Asignación de especies para cada etapa del proceso

La asignación del orden de las especies en el circuito del proceso de biodegradación es un aspecto fundamental que requiere una cuidadosa evaluación. En este sentido, es importante considerar las condiciones físicas finales de los trozos de EPS y RBD una vez que la larva haya concluido su consumo.

Según los resultados del experimento, se observó que los remanentes de RBD corresponden principalmente a partes secas y duras del alimento, lo que sugiere que este elemento no influye significativamente en el orden de las especies. Cada etapa del proceso tendrá un flujo diferente de RBD, lo que minimiza el impacto de este factor en la asignación de las especies.

Por otro lado, se observaron trozos remanentes de EPS más considerables, con un mayor volumen que el RBD, y para ambas especies se observó un comportamiento similar. Existe un consumo de EPS, pero solo hasta cierto punto, ya que hay factores que influyen en la capacidad de las larvas para consumir el EPS, como la cercanía de la larva para realizar su metamorfosis, la disponibilidad de alimento u otras condiciones ambientales que generen estrés o mortalidad de los individuos.

Considerando estos factores y la familiaridad entre ambas especies ante la presencia de EPS en su colonia, se puede concluir que el orden de las larvas en las etapas es indiferente para el rendimiento del proceso. Por lo tanto, se considerará que en la etapa 1 corresponderá a las larvas de *Tenebrio molitor* y la etapa 2 a las larvas de *Zophobas morio*. Esta asignación permitirá evaluar el rendimiento del proceso y la eficiencia de cada especie en la biodegradación del EPS.

7.6 Selección del tiempo de simulación

El tiempo de simulación seleccionado para el proceso de biodegradación es de 60 días, divididos en ciclos de 15 días cada uno. Esta duración se basa en el ciclo de vida de las larvas de las especies seleccionadas, que permanecen en su etapa larvaria durante aproximadamente 60 días. Durante este período, las larvas presentan un consumo notable de EPS, lo que las convierte en agentes efectivos para la biodegradación de este material. Las larvas experimentan cambios fisiológicos y comportamentales al acercarse a la etapa de pupa, lo que reduce su capacidad para consumir EPS. Durante la etapa de pupa, las larvas se transforman en escarabajos adultos, perdiendo su capacidad para consumir EPS debido a su nueva dieta y estilo de vida. La capacidad de las larvas para consumir EPS es una característica específica de su etapa de desarrollo y no se mantiene en la etapa adulta.

Los ciclos de 14 días han sido cuidadosamente seleccionados para permitir un mantenimiento regular y eficiente de la colonia, dejando un día para el mantenimiento. Este período de tiempo permite la retirada oportuna del EPS para integrarlo a la siguiente etapa, la limpieza general del contenedor y la eliminación del sustrato con exceso de humedad, heces, larvas fallecidas y la piel sobrante del proceso de ecdisis. Además, este período de tiempo ayuda a prevenir la posible descomposición del RBD, que podría ser

perjudicial para la salud de la colonia. La descomposición del RBD puede generar condiciones insalubres y afectar negativamente el bienestar de las larvas.

En consecuencia, la selección del tiempo de simulación de 60 días, divididos en ciclos de 14 días más uno de mantenimiento, se basa en una cuidadosa evaluación del ciclo de vida de las larvas y de las necesidades de mantenimiento de la colonia. Este enfoque garantiza la salud y la eficiencia de la colonia en la biodegradación del EPS.

7.7 Selección del tipo de proceso

La selección del tipo de proceso adecuado para la biodegradación del EPS depende del tiempo de simulación establecido. A continuación, se presentan las opciones disponibles:

a) Proceso Batch (para tiempos iguales o inferiores a 2 meses): Este tipo de proceso es adecuado para tiempos de simulación cortos, en los que la carga de EPS es relativamente baja y no requiere una operación continua. En este caso, el proceso se puede realizar en lotes, lo que permite una mayor flexibilidad y control sobre la operación.

b) Proceso Continuo (para tiempos mayores a un año): Este tipo de proceso es adecuado para tiempos de simulación largos, en los que la carga de EPS es alta y requiere una operación continua. En este caso, el proceso se puede realizar de manera continua, lo que permite una mayor eficiencia y productividad.

c) Proceso Semi-Continuo (para tiempos entre 2 meses y un año): Este tipo de proceso es adecuado para tiempos de simulación moderados, en los que la carga de EPS es relativamente alta, pero no requiere una operación continua. En este caso, el proceso se puede realizar en una serie de lotes, lo que permite una mayor flexibilidad y control sobre la operación.

La selección del tipo de proceso adecuado dependerá de las necesidades específicas del proyecto y de las características del EPS que se va a biodegradar. Es importante considerar

factores como la carga de EPS, el tiempo de simulación, la eficiencia y la productividad, para seleccionar el tipo de proceso que mejor se adapte a las necesidades del proyecto.

7.8 Selección del tipo de flujo para la biodegradación de EPS

En el caso de procesos con dos o más etapas, es fundamental seleccionar el tipo de flujo adecuado para maximizar la eficiencia y minimizar los residuos. A continuación, se presentan las opciones disponibles:

a) Flujo Paralelo: En este tipo de flujo, los flujos de entrada y salida se realizan de manera paralela, lo que permite una mayor flexibilidad y control sobre el proceso.

b) Flujo a Contracorriente: En este tipo de flujo, los flujos de entrada y salida se realizan en sentido contrario, lo que permite una mayor eficiencia en la transferencia de masa y energía.

c) Flujo Cruzado: En este tipo de flujo, los flujos de entrada y salida se realizan de manera perpendicular, lo que permite una mayor eficiencia en la mezcla y la transferencia de masa y energía.

Para seleccionar el tipo de flujo adecuado, es fundamental considerar los siguientes criterios:

- Minimización de residuos: El objetivo es minimizar la cantidad de residuos generados durante el proceso, lo que incluye la cantidad de EPS no biodegradado, la cantidad de RBD (lechuga) generada y la cantidad de agua utilizada.
- Máximo consumo de EPS: El objetivo es maximizar el consumo de EPS durante el proceso.

- Huella de carbono: El objetivo es minimizar la huella de carbono generada durante el proceso, lo que incluye la cantidad de CO₂ equivalente emitido durante la producción de los recipientes de plástico y la cantidad de energía utilizada durante el proceso.
- Uso de agua: El objetivo es minimizar el uso de agua durante el proceso, lo que incluye la cantidad de agua utilizada para la limpieza de los recipientes y la cantidad de agua utilizada durante la biodegradación del EPS.
- Tiempo de duración del proceso: El objetivo es determinar la cantidad de tiempo que dura el proceso para la simulación, lo que incluye la cantidad de tiempo necesario para la biodegradación del EPS y la cantidad de tiempo necesario para la generación de RBD (lechuga).

7.9 Balances de masa

La secuencia de cálculos se realizó utilizando la ecuación general del balance de materia, la cual se fundamenta en el principio de conservación de la masa ([Himmelblau, 1989](#)). Dado que el proceso es de tipo Batch, es decir, un proceso discontinuo en el que se procesa una cantidad determinada de materia en un período de tiempo específico, la acumulación de masa es cero ($\Delta m = 0$). La ecuación general del balance de materia se puede expresar de la siguiente manera:

$$\Delta m = m_{\text{entrada}} - m_{\text{salida}} + m_{\text{generado}} - m_{\text{consumido}}$$

Donde:

Δm : Cambio en la masa del sistema

m_entrada: Masa que entra al sistema

m_salida: Masa que sale del sistema

m_generado: Masa generada dentro del sistema

m_consumido: Masa consumida dentro del sistema

Para entender correctamente el balance de materia, es fundamental definir los términos clave involucrados en el proceso. A continuación, se presentan estas definiciones:

La entrada se refiere al ingreso inicial de materiales, en este caso, EPS o RBD, al principio del proceso. Este es el punto de partida para el balance de materia, y es fundamental determinar con precisión la cantidad de materiales que entran en el proceso.

La salida, por otro lado, corresponde al remanente de EPS o RBD que se extrae al final de cada ciclo o al final del proceso. Esto incluye cualquier material que no haya sido degradado o transformado durante el proceso.

La generación de desechos es un aspecto importante del balance de materia. En este caso, la generación se refiere a todos los desechos producidos por las larvas, incluyendo heces, pieles sobrantes de la ecdisis, larvas fallecidas, así como el aumento de masa de cada larva. Es importante tener en cuenta que el cálculo del aumento de masa de cada larva puede ser complejo dependiendo del número de larvas en la colonia.

Finalmente, el consumo se define como la cantidad de materia degradada por las larvas. Esto es un aspecto fundamental del balance de materia, ya que permite determinar la eficiencia del proceso y la cantidad de materiales que se han degradado.

Los cálculos realizados se presentan en el Anexo 2 - Datos y cálculos, donde se pueden encontrar los valores de interés para el RBD y el EPS. Estos cálculos son fundamentales para entender el proceso y tomar decisiones informadas sobre la gestión de los residuos.

7.10 Cálculo de huella de carbono

El cálculo de la huella de carbono es un aspecto fundamental para evaluar el impacto ambiental del proceso de biodegradación del EPS. La huella de carbono se refiere a la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos durante el proceso, expresada en términos de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq).

El cálculo de la huella de carbono implica considerar varias fuentes de emisiones de GEI, incluyendo:

- Material utilizado en recipientes: El material utilizado en los recipientes puede generar emisiones de GEI durante su producción y transporte.
- Fabricación del sustrato: La fabricación del sustrato utilizado (harina) también puede generar emisiones de GEI durante su producción y transporte.
- Agua utilizada para el lavado de recipientes: El uso de agua para el lavado de recipientes puede generar emisiones de GEI durante su tratamiento y transporte.
- Residuos finales que quedan del proceso de biodegradación: Pueden generar emisiones de GEI durante su tratamiento y eliminación.
- Calefacción: Para mantener las condiciones óptimas para las larvas se necesita mantener una cierta temperatura, por lo que es preferible mantener con calefacción el espacio donde ocurre el proceso, sobre todo si este ocurre en zonas o épocas donde las temperaturas son mas bajas.

Por el momento, se excluyen los factores relacionados con el transporte, ya que están influenciados por variables como la ubicación geográfica de origen y destino, el tipo de transporte utilizado y otros factores. Por lo tanto, se consideran iguales o similares en los análisis comparativos, con el fin de enfocarse en los aspectos más relevantes del proceso.

7.12 Resumen de la metodología

La metodología propuesta para este estudio se puede sintetizar en una secuencia de pasos claramente definidos. A continuación, se presentan los pasos secuenciales que se seguirán:

- Paso 0: Revisión y cumplimiento del marco legal vigente.
- Paso 1: Revisión y consideración de los datos e información de laboratorio relevante.
- Paso 2: Selección del número óptimo de etapas para el proceso.
- Paso 3: Determinación del número de recipientes necesarios para cada etapa.
- Paso 4: Asignación de especies adecuadas para cada etapa del proceso.
- Paso 5: Selección del tiempo de simulación adecuado.
- Paso 6: Selección del tipo de proceso más adecuado.
- Paso 7: Selección del tipo de flujo más adecuado.
- Paso 8: Realización de balances de masa para garantizar la coherencia del proceso.
- Paso 9: Cálculo de la huella de carbono para evaluar el impacto ambiental.

Estos pasos metodológicos proporcionarán la base para alcanzar los resultados que se presentan en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 8: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Selección del tipo de proceso

La metodología de procesamiento por lotes (batch) ha sido seleccionada como la opción más adecuada para esta simulación, debido a varias razones clave que se alinean con las características específicas de la carga de EPS y RBD.

En primer lugar, la naturaleza discontinua de la carga requiere una metodología flexible que pueda adaptarse a las variaciones en la carga y los tiempos de residencia. El procesamiento por lotes ofrece esta flexibilidad, permitiendo ajustar las condiciones de operación y monitorear los parámetros críticos de manera efectiva. Esto es particularmente importante en la biodegradación de EPS y RBD, donde las condiciones de operación pueden variar significativamente.

En segundo lugar, los tiempos de residencia relativamente cortos requeridos para la biodegradación de EPS y RBD hacen que el procesamiento por lotes sea la opción más adecuada. Esto se debe a que el procesamiento por lotes permite un control más preciso sobre los tiempos de residencia y las condiciones de operación, lo que es fundamental para optimizar la biodegradación. Además, al trabajar con lotes discretos, se facilita el control de las variables de entrada y la obtención de resultados reproducibles.

La precisión y la reproducibilidad son fundamentales en la simulación, ya que permiten obtener resultados confiables y generalizables. El procesamiento por lotes ofrece una mayor precisión y control sobre las condiciones de operación, lo que es esencial para simular con precisión la biodegradación de EPS y RBD.

8.2 Selección del tipo de flujo

La elección del flujo cruzado como configuración óptima para el proceso de biodegradación de EPS y RBD se basa en una evaluación exhaustiva de los criterios establecidos y las características inherentes a este tipo de flujo. A continuación, se presentan los motivos que sustentan esta elección:

En primer lugar, el flujo cruzado permite una mayor eficiencia en la transferencia de masa y calor entre las fases líquida y sólida. Esto es especialmente importante en la biodegradación de EPS y RBD, donde la transferencia de masa y calor es esencial para optimizar la velocidad de degradación.

En segundo lugar, el flujo cruzado facilita la suspensión y el mezclado de los sólidos en la fase líquida, lo que garantiza una distribución uniforme de los microorganismos y los nutrientes. Esto es fundamental para mantener una población microbiana saludable y activa, lo que a su vez optimiza la biodegradación.

Además, el flujo cruzado permite una mayor flexibilidad en la operación del proceso, ya que se puede ajustar fácilmente la velocidad de flujo y la relación entre las fases líquida y sólida. Esto es especialmente importante en la biodegradación de EPS y RBD, donde las condiciones de operación pueden variar dependiendo de la composición y la cantidad de los residuos.

8.3 Balances de masa y evaluación de la huella de carbono

A continuación, se presentan los resultados de los balances de masa para el RBD y el EPS en el proceso de biodegradación a través de larvas. Además, se muestra el resultado del cálculo de la huella de carbono total generada durante todo el proceso, desglosada por componentes.

Los balances de masa son fundamentales para entender la dinámica del proceso de biodegradación y evaluar la eficiencia del mismo. A través de estos balances, se pueden determinar las cantidades de RBD y EPS que se degradan, así como las cantidades de productos intermedios y finales generados durante el proceso.

La evaluación de la huella de carbono es igualmente importante, ya que permite cuantificar el impacto ambiental del proceso de biodegradación. La huella de carbono se calcula considerando las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas durante todo el proceso, desde la recolección y transporte de los residuos hasta la biodegradación y el tratamiento de los productos finales.

Los cálculos detallados y las nomenclaturas utilizadas en este análisis se pueden encontrar en el Anexo 2 - Datos y Cálculos. Allí se presentan las ecuaciones y los parámetros utilizados para realizar los balances de masa y calcular la huella de carbono. Los datos de huella de carbono fueron recopilados según el protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG Protocol) y modificados para mantener una nomenclatura común con tal de realizar la comparación.

8.3.1 Balance de masa de RBD

A continuación, se presenta el balance de masa para RBD utilizado en el proceso de biodegradación. La tabla 4 muestra los datos iniciales utilizados para calcular el balance de masa:

Tabla 4. Datos iniciales para el balance de masa de RBD

Tasa de consumo de RBD	g/día/larva	Nº de larvas
<i>Tenebrio molitor</i>	0,0012	1000
<i>Zophobas morio.</i>	0,003	500

Fuente: Elaboración propia.

El balance de masa se calculó considerando la tasa de consumo de RBD por cada especie de larva y el número de larvas utilizadas en el proceso. La ecuación utilizada para calcular el balance de masa es la siguiente:

$$\text{Balance de masa} = (\text{Tasa de consumo de RBD} \times \text{Número de larvas}) / \text{Tiempo de biodegradación}$$

Donde:

- Tasa de consumo de RBD: se expresa en gramos por día y por larva.
- Número de larvas: se refiere al número total de larvas utilizadas en el proceso.
- Tiempo de biodegradación: se refiere al tiempo necesario para que las larvas degraden el RBD.

A continuación, se presentan los datos de flujos aplicados en el proceso de biodegradación. La tabla 5 muestra los flujos de RBD expresados en gramos por ciclo, donde cada ciclo tiene una duración de 14 días.

Tabla 5. Datos de flujos de RBD

Flujo	g de RBD/ciclo (14 días)
RBD _{0,1}	50
RBD _{0,2}	100
RBD _{1,s}	42
RBD _{2,s}	84

Fuente: Elaboración propia.

Los flujos de RBD se han clasificado en cuatro categorías, según su composición y características. Cada tipo de RBD tiene un flujo asociado, que se ha calculado considerando la cantidad de RBD que se procesa en cada ciclo.

Es importante destacar que los flujos de RBD pueden variar dependiendo de las condiciones específicas del proceso de biodegradación, como la temperatura, la humedad y la presencia de microorganismos. Por lo tanto, es fundamental monitorear y ajustar los flujos de RBD según sea necesario para garantizar la eficiencia y la efectividad del proceso.

8.3.2 Balance de masa de EPS

A continuación, se presenta el balance de masa para el EPS utilizado en el proceso de biodegradación. La tabla 6 muestra los datos iniciales utilizados para calcular el balance de masa:

Tabla 6. Datos iniciales para el balance de masa de EPS

Tasa de consumo de EPS	g/día/larva	Nº de larvas
<i>Tenebrio molitor</i>	0,0008	1000
<i>Zophobas morio.</i>	0,0002	500

Fuente: Elaboración propia.

El balance de masa se calculó considerando la tasa de consumo de EPS por cada especie de larva y el número de larvas utilizadas en el proceso. La ecuación utilizada para calcular el balance de masa es la siguiente:

$$\text{Balance de masa} = (\text{Tasa de consumo de EPS} \times \text{Número de larvas}) / \text{Tiempo de biodegradación}$$

Donde:

- Tasa de consumo de EPS: se expresa en gramos por día y por larva.
- Número de larvas: se refiere al número total de larvas utilizadas en el proceso.
- Tiempo de biodegradación: se refiere al tiempo necesario para que las larvas degraden el EPS.

Es importante destacar que, la tasa de consumo de EPS es significativamente menor que la tasa de consumo de RBD, lo que sugiere que las larvas tienen una mayor preferencia por el RBD. Sin embargo, esto no implica que el EPS no sea degradado, ya que las larvas aún pueden degradar una cantidad significativa de EPS correspondiente al 94,4% en 60 días.

A continuación, se presentan los datos de flujos de EPS utilizados en el proceso de biodegradación. La tabla 7 muestra los flujos de EPS expresados en gramos:

Tabla 7. Flujos de EPS

Flujo	g de EPS
EPS _{0,1}	25
EPS _{1,2}	19
EPS _{2,s}	1,4

Fuente: Elaboración propia.

Los flujos de EPS se han clasificado en tres categorías, según su composición y características. Cada tipo de EPS tiene un flujo asociado, que se ha calculado considerando la cantidad de EPS que se procesa en cada ciclo.

8.4 Huella de carbono

La huella de carbono es una medida que evalúa el impacto ambiental de un proceso o actividad, el protocolo de gases de efecto invernadero (GHG Protocol) es expresado en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO₂). A continuación, se presentan los resultados del cálculo de la huella de carbono para el proceso de biodegradación de EPS y RBD.

Tabla 8. Resultado de cálculo de huella de carbono

Origen	g CO₂eq
Harina	810
Contenedores (polipropileno)	45,5
Lavado	3052,8
EPS remanente	59905,02
EPS reducido	-1009827,48
RBD remanente	4573,11
RBD reducido	-24008,82
Consumo eléctrico	110505783,7
Total	109471947,4
Total s/consumo eléctrico	-965449,86

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que el consumo eléctrico es el principal contribuyente a la huella de carbono del proceso, con una emisión de 110.505.783,7 g de CO₂eq. Sin embargo, cuando se excluye el consumo eléctrico, la huella de carbono se vuelve negativa, lo que indica que el proceso de biodegradación de EPS y RBD tiene un impacto ambiental positivo.

8.4 Discusiones

La viabilidad del proceso de biodegradación de EPS y RBD desde una perspectiva de sostenibilidad ambiental se ve significativamente influenciada por la huella de carbono asociada al consumo eléctrico para la calefacción. Los resultados obtenidos en este estudio revelan que el consumo eléctrico para la calefacción es un componente crítico de la huella de carbono del proceso, lo que plantea desafíos significativos para la reducción de gases de efecto invernadero (GEI) y la mitigación del cambio climático.

En efecto, la calefacción es un paso fundamental en el proceso de biodegradación, ya que permite optimizar las condiciones para la actividad microbiana y la degradación de los residuos. Sin embargo, la generación de calor a través del consumo eléctrico tiene un impacto significativo en la huella de carbono del proceso, lo que puede comprometer la sostenibilidad ambiental del mismo.

Por lo tanto, es fundamental evaluar y mitigar el impacto del consumo eléctrico para la calefacción en el proceso de biodegradación de EPS y RBD, con el objetivo de reducir la huella de carbono y promover una mayor sostenibilidad ambiental. Esto puede lograrse a través de la implementación de tecnologías más eficientes y sostenibles, como:

- La utilización de energías renovables, como la energía solar o eólica, para generar calor y reducir la dependencia de fuentes de energía fósiles.
- La optimización de la eficiencia energética del proceso, mediante la implementación de sistemas de control y monitoreo de la temperatura y la humedad.
- La reducción de la demanda de calor, mediante la utilización de materiales aislantes y la optimización del diseño de los contenedores.

Además, existen oportunidades para reducir la huella de carbono del proceso mediante la implementación de estrategias y tecnologías más sostenibles. Algunas de estas oportunidades incluyen:

- La consideración de otros materiales vegetales, como la utilización de residuos agrícolas o forestales, para reducir la demanda de materiales vírgenes.
- La utilización de contenedores más eficientes en términos de energía y recursos, como la utilización de contenedores de plástico reciclado.

- La implementación de sistemas de calefacción más eficientes, como la utilización de sistemas de calefacción por biomasa.

La implementación efectiva de estrategias y tecnologías sostenibles es fundamental para reducir significativamente la huella de carbono del proceso de biodegradación de EPS y RBD, y promover una mayor sostenibilidad ambiental. La colaboración y el compromiso de todos los actores involucrados en el proceso, desde los productores de materiales hasta los consumidores finales, son fundamentales para lograr una mayor sostenibilidad y reducir el impacto ambiental del proceso.

En particular, la exploración de alternativas innovadoras para mantener la temperatura óptima en el proceso de biodegradación es esencial para minimizar la huella de carbono. La implementación de soluciones sostenibles como la utilización de energías renovables, la integración de sistemas de aislamiento térmico avanzados o la optimización de la eficiencia energética podría tener un impacto significativo en la reducción de la huella de carbono del proceso.

Por lo tanto, es fundamental evaluar y comparar estas opciones para determinar su viabilidad, eficacia y potencial de reducción de la huella de carbono. Esta evaluación permitirá identificar las soluciones más adecuadas y sostenibles para minimizar el impacto ambiental del proceso y contribuir a un futuro más sostenible. Además, la implementación de estas soluciones podría tener beneficios adicionales como la reducción de costos energéticos y la mejora de la eficiencia del proceso.

CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente metodología de diseño ha explorado exhaustivamente el potencial de las larvas de *Tenebrio molitor* y *Zophobas morio* como biodegradadores de plásticos, revelando una alternativa prometedora y sostenible para el tratamiento de residuos plásticos. A través de una investigación rigurosa, se ha demostrado que esta tecnología ofrece una solución innovadora y eficaz para abordar el problema creciente de la contaminación plástica.

Uno de los objetivos de esta investigación fue identificar los criterios y condiciones óptimas que permitan una mayor capacidad de biodegradación. En este sentido, se ha

encontrado que la temperatura ambiental juega un papel fundamental, ya que influye directamente en el metabolismo de la larva y, por lo tanto, en su capacidad para consumir y degradar el poliestireno expandido (EPS). Esto sugiere que la optimización de la temperatura ambiental podría ser una estrategia clave para mejorar la eficiencia del proceso de biodegradación.

El tema de la temperatura se convierte en un desafío crítico en el diseño de un proceso de biodegradación sostenible y eficiente energéticamente, ya que la optimización de la temperatura para maximizar la capacidad de biodegradación de las larvas conlleva un aumento en el consumo de energía y, por lo tanto, una mayor huella de carbono. Esto genera un conflicto de objetivos que presenta un desafío significativo en el diseño de este proceso, ya que se busca equilibrar la eficiencia energética con la sostenibilidad ambiental. Para abordar esta problemática, es necesario explorar soluciones innovadoras que permitan reducir el consumo de energía y minimizar la huella de carbono. La inclusión de aislantes de temperatura para reducir la pérdida de calor y mantener una temperatura óptima con un menor consumo de energía es una posible solución. Además, la búsqueda de fuentes de energía renovables y sostenibles, como la energía solar o eólica, que no tengan una huella de carbono significativa, es fundamental para reducir la dependencia de fuentes de energía fósiles y promover la transición hacia una economía más sostenible.

La integración de estas soluciones permitirá diseñar un proceso de biodegradación que sea a la vez eficiente, sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Esto no solo contribuirá a reducir la cantidad de residuos plásticos en el medio ambiente, sino que también promoverá el desarrollo de tecnologías más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

Al considerar la implementación de este proceso a una escala mayor, es fundamental tener en cuenta los desafíos logísticos y de manejo que conlleva el cultivo de estos organismos. La cría de larvas de *Tenebrio molitor* y *Zophobas morio* requiere una atención meticulosa y un manejo cuidadoso para garantizar su salud y bienestar. El manejo de estas larvas y pupas requiere el uso de elementos de protección personal, como guantes, para evitar cualquier riesgo de lesión o contaminación. Esto es especialmente crítico durante la etapa de retirada de las pupas, que son extremadamente delicadas y fundamentales para el desarrollo de la colonia. A medida que la escala del proceso aumenta, con decenas de contenedores que albergan cientos de individuos cada uno, el trabajo requerido para

mantener y manejar la colonia se vuelve cada vez más exhaustivo. En este contexto, el margen de error humano aumenta significativamente, lo que puede tener consecuencias negativas para la salud y la productividad de la colonia. Por lo tanto, es esencial implementar protocolos y procedimientos estrictos para garantizar el manejo adecuado y la atención necesaria para estas larvas y pupas, especialmente a medida que la escala del proceso aumenta. Esto puede incluir la capacitación de personal especializado, la implementación de sistemas de monitoreo y control, y la adopción de tecnologías innovadoras para optimizar el manejo y la productividad de la colonia.

A pesar de los desafíos pendientes como generar un modelo de negocio realizando un análisis económico y de sostenibilidad del proyecto para una implementación a mayor escala, los cuales requieren investigaciones adicionales debido a la complejidad del tema y a la falta de datos específicos, los resultados obtenidos en este estudio son sumamente alentadores y abren nuevas perspectivas para el desarrollo de soluciones innovadoras y sostenibles para el problema de la contaminación por plásticos. Sin embargo, es fundamental reconocer que aún existen brechas de conocimiento y desafíos técnicos que deben ser superados para consolidar esta tecnología. Para abordar estos desafíos, se requieren estudios a largo plazo que permitan evaluar la eficacia y la sostenibilidad de esta tecnología en diferentes contextos y escalas. Además, es esencial invertir en el desarrollo y la implementación de tecnologías avanzadas para el análisis de los componentes de las corrientes del proceso, lo que permitirá una mejor comprensión de los mecanismos involucrados y la optimización de la tecnología. La integración de estas tecnologías y la realización de estudios a largo plazo permitirán abordar los desafíos pendientes y consolidar esta tecnología como una solución innovadora y sostenible para el problema de la contaminación por plásticos. Esto no solo contribuirá a reducir la cantidad de residuos plásticos en el medio ambiente, sino que también promoverá el desarrollo de una economía circular y sostenible.

REFERENCIAS

- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (2024, 30 mayo). Descripción general de los gases de efecto invernadero. Recuperado de <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- Agenda País. (2023, 22 marzo). Chile es el país latinoamericano que genera más desechos plásticos de un solo uso. El Mostrador. Recuperado de

<https://www.elmostrador.cl/agenda-pais/2021/07/03/chile-es-el-pais-latinoamericano-o-que-genera-mas-desechos-plasticos-de-un-solo-uso/>

- Albarracín & Clavijo (2021). Condiciones ambientales y biológicas del Tenebrio Molitor en la degradación de poliestireno. <https://doi.org/10.47796/ing.v3i2.531>
- Albert, L. A. (2011). Contaminación ambiental. Origen, clases, fuentes y efectos. Lima, Perú: Aprendo.
- Allen, D., Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2013). The green, blue and grey water footprint of crop and livestock products. *Ecological Economics*, 93, 59-69.
- Arellano D y Velásquez S, (2017), Manual de cría de invertebrados para alimentación complementaria, Gobierno Bolivariano de Venezuela
- Boada; Colom y Castelló. (2011). La experimentación animal. 1 recurso electrónico (202 p.). (Treballs de l'assignatura Deontologia Veterinària)
- Cerda, Cortés, Berttini, París y Ríos. (2014). Exposición a agentes de riesgo biológico en trabajadores chilenos. Universidad Católica de Chile. Centro de información Toxicológica y de medicamentos. Santiago de Chile.
- Cerdá, E., & Khalilova, A. (2016). Economía circular. *Economía industrial*, 401(3), 11-20.
- Chile. (1994). Ley N° 19.300 - Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Disponible en <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>
- Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J. I., Irigoien, X., Úbeda, B., Hernández-León, S., ... & Duarte, C. M. (2014). Plastic debris in the world's oceans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(28), 10239-10244.
- Daviran, A. (2017). Biodegradación de la Espuma de Poliestireno por la larva de Tenebrio molitor para la producción de abono. Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería.
- Dreyer, M., Hörtenhuber, S., Zollitsch, W. et al. Environmental life cycle assessment of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) production for human consumption in Austria – a comparison of mealworm and broiler as protein source. *Int J Life Cycle Assess* 26, 2232–2247 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01980-4>
- EcoClean (2024). Plumavit: Material a Reciclar. Recuperado el 15 de Noviembre de 2024 de <https://www.ecoclean.cl/plumavit-material-a-reciclar/>.

- Environmental implications of styrofoam waste and its utilization as lightweight fill material for embankment construction. Aditia Febriansya, Iskandar, Dewi Amalia, Risma Nur Indah, Yulia Widyaningsih. E3S Web of Conf. 479 07036 (2024). DOI: 10.1051/e3sconf/202447907036
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated 1 transition. Ellen MacArthur Foundation.
- Fauna Exótica (2005) fases de la vida de la zophoba morio. Recuperado el 15 de Noviembre de 2024 de <https://www.faunaexotica.net/gallery/fases-de-la-vida-de-la-zophoba-morio-jpg.10345/>
- Ge-Xia Wang, Dan Huang, Jun-Hui Ji, Carolin Völker, and Frederik R. Wurm. (2021). Seawater-Degradable Polymers - Fighting the MarinePlastic Pollution. National Engineering Research Center of Engineering PlasticsTechnical Institute of Physics and ChemistryThe Chinese Academy of Sciences. doi: 10.1002/advs.20200112
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science, 358(6362), 347-350.
- Gobierno de Chile. (1993). Ley N° 19.300: Ley General de Bases del Medio Ambiente
- Gobierno de Chile. (2016). Ley N° 20.920: ESTABLECE MARCO PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS, LA RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR Y FOMENTO AL RECICLAJE
- Gobierno de Chile. (2021). Ley N° 21.368: REGULA LA ENTREGA DE PLÁSTICOS DE UN SOLO USO Y LAS BOTELLAS PLÁSTICAS, Y MODIFICA LOS CUERPOS LEGALES QUE INDICA
- Gómez-Ibáñez, D., & Sáiz-Jiménez, C. (2013). Biodeterioro de monumentos y biorremediación: Estado actual y perspectivas futuras. Anales de la Real Academia de Farmacia, 79(4), 881-899.
- Gómez, M., Rodríguez, J., & Pérez, A. (2022). Efecto de la temperatura y la humedad en la descomposición de residuos orgánicos y su impacto en la nutrición de Tenebrio molitor.

- GreenMax (2024) reciclaje de plumavit redefine la forma de reciclar el plumavit en Chile y en el mundo. Recuperado el 15 de Noviembre de 2024 de <https://www.poliestireno-reciclado.es/reciclaje-de-plumavit-en-chile.html>
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a waste: A global review of solid waste management. World Bank Publications.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment 1 Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., ... & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. Science, 347(6223), 768-771.
- Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development;. © Washington, DC: World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/30317> License: CC BY 3.0 IGO.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2005). Operaciones unitarias en ingeniería química. McGraw-Hill.
- Mariano. (3 de junio de 2011). Blog dedicado a los materiales plásticos, características, usos, fabricación, procesos de transformación y reciclado. Tecnología de los Plásticos. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/poliestireno.html>.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The global footprint of water resources. Science, 334(6054), 481-482.
- Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2021). Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos Chile 2040.
- Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (22 de julio de 2021). “2040: El año en que Chile se ha propuesto ser un país sin basura”. Recuperado de <https://chilecircularsinbasura.mma.gob.cl/>
- Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (Año). Huella de carbono y cambio climático. Recuperado de <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono/>

- Moran, Michael. J., Shapiro, Howard. N. (2015). Fundamentos de termodinámica técnica. Reverté
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. (2021). Resumen para responsables de políticas.
- Park, H.C., Jung, B.H., Han, T.M., Lee, Y.B., Kim, S.H., Kim, N.J.,(2013). Taxonomy of introduced commercial insect, *Zophobas atratus* (Coleoptera; Tenebrionidae) and a comparison of DNA barcoding with similar tenebrionids, *Promethis valgipes* and *Tenebrio molitor* in Korea. J. Seric. Entomol. Sci. 51, 185–190.
- Pearce, D.W. y Turner, R.K. (1990), Economics of the Natural Resources and environment, Londres, Harvester Wheatsheaf
- Plastics Europe. (2022). Plastics The Facts.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2023). Contaminación por plásticos.
- RECYTRANS. (13 de May de 2014). “Tratamiento de residuos”. Recuperado de <https://www.recytrans.com/blog/tratamiento-de-residuos/>
- Rojas González, A. (2012). Fundamentos de procesos químicos. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (3 de Julio de 2018). Informe 1: Diagnóstico de la situación por comuna y por región en materia de RSDyA
- Treybal, R. E. (1998). Operaciones de Transferencia de Masa. Ed. Mc Graw Hill.
- UNEP. (2019). Global Environment Outlook.
- UNEP (2019). Single-use plastics: A roadmap for sustainability. United Nations Environment Programme.
- Universidad de Granada (2018). Impacto ambiental del poliestireno expandido (EPS) en la acuicultura. <http://www.ugr.es/~jmrs/english.htm>

- Van Fan, Y., Jiang, P., Hemzal, M., & Klemeš, J. J. (2020). An update of COVID-19 influence on waste management. *Science of The Total Environment*, 142014. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.14201
- Van Huis, A. (2013). Edible insects: Future prospects for food and feed security. *FAO Forestry Paper*, 171
- Wang, Y., & Shelomi, M. (2015). Effects of temperature, humidity, and photoperiod on the development and reproduction of the darkling beetle, *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Insect Science*, 15(1), 1-10.
- World Wildlife Fund (WWF). (2020). Huella de carbono: ¿Qué es y cómo reducirla?
- World Wildlife Fund (WWF). (2020). Living Planet Report 2020. Gland, Switzerland: WWF.
- Yang, S.-S., Ding, M.-Q., He, L., Zhang, C.-H., Li, Q.-X., Xing, D.-F., Cao, G.-L., Zhao, L., Ding, J., Ren, N.-Q., & Wu, W.-M. (2020a). Biodegradation of Polypropylene by Yellow Mealworms (*Tenebrio molitor*) and Superworms (*Zophobas atratus*) via Gutmicrobe-dependent Depolymerization. *Science of The Total Environment*, 144087. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144087
- Yang, Y., Wang, J., & Xia, M. (2020b). Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating superworms *Zophobas atratus*. *Science of The Total Environment*, 708, 135233. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135233
- Yang, Y., Yang, J., Wu, W.-M., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., Yang, R., Jiang, L., (2015a). Biodegradation and mineralisation of polystyrene by plastic-eating mealworms: part 1. Chemical and physical characterisation and isotopic tests. *Environ. Sci. Technol.* 9, 12080–12086.
- Yang, Y., Yang, J., Wu, W. M., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., ... & Jiang, L. (2015b). Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: part 2. Role of gut microorganisms. *Environmental science & technology*, 49(20), 12087-12093.

