



UNIPUTUMAYO

INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIENCIAS BÁSICAS

NOMBRE DEL CAMPO

Evaluación de la biodegradación de polímeros (LDPE y PP) por larvas de *Galleria mellonella* en condiciones de laboratorio

Ingeniería Ambiental

Josselin Rachel Ramírez Ortiz

Director de tesis:

Juan Fernando Revelo

Biólogo

Mocoa, junio 30 de 2025

Dedicatoria

A mi madre, quien con esfuerzo, trabajo y amor me inculcó los valores que hoy guían mi vida. Gracias a ti aprendí a soñar, a luchar y a levantarme cada vez que fue necesario. Cada logro que alcanzo lleva impreso tu sacrificio, tu ejemplo y tu infinito amor. Espero poder llenarte de orgullo y felicidad con cada uno de mis triunfos.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a la Universidad del Putumayo, por abrirme las puertas al conocimiento y brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente. Esta institución no solo me permitió adquirir saberes académicos, sino también crecer como persona, fortalecer mis valores y desarrollar un compromiso ético y social con mi profesión. Cada experiencia vivida, cada clase y cada desafío superado dentro de sus aulas han contribuido significativamente a la construcción de mi proyecto de vida.

Expreso mi sincero agradecimiento a mi asesor de tesis, Juan Fernando Revelo, por su constante acompañamiento, su orientación oportuna y su paciencia durante todo este proceso. Su dedicación, compromiso y valiosos aportes fueron fundamentales para la culminación de este trabajo, así como para mi aprendizaje y mi formación investigativa.

A mi familia, mi más profundo reconocimiento y gratitud. Gracias por su amor incondicional, por su comprensión y por ser mi principal fuente de fortaleza. Han estado conmigo en los momentos más difíciles y en los más felices, y me han alentado a continuar cuando las fuerzas parecían agotarse. Cada logro alcanzado es también el reflejo de su apoyo y sacrificio.

A mis amigos, gracias por acompañarme en este camino, por sus palabras de aliento, su compañía sincera y su apoyo incondicional. Su presencia hizo que este proceso fuera más llevadero y lleno de momentos de alegría que siempre recordaré con cariño.

Finalmente, a mi jefa, gracias por su comprensión, por brindarme la oportunidad de equilibrar mis responsabilidades laborales y académicas, y por su confianza en mi desempeño. Su apoyo me permitió seguir creciendo tanto en el ámbito profesional como en el personal, y fue un pilar importante para lograr esta meta.

Índice

1 Introducción	10
2 Marco teórico	12
3 Marco conceptual.....	14
3.1 Biología y Ecología de <i>Galleria mellonella</i>	14
3.2 Polilla de la cera.....	16
3.3 LDPE.....	17
3.4 PP.....	18
3.5 Biodegradación	19
4 Marco contextual.....	21
5 Marco legal	23
6 Objetivo....	24
6.1 Objetivo general	24
6.2 Objetivos específicos	24
7 Materiales y métodos	25
7.1 Obtención y cría de larvas.....	25
7.1.1 Diseño experimental y monitoreo	26
7.1.2 Monitoreo del experimento	26
7.2 Análisis del consumo y la biodegradación	27
7.2.1 Condiciones de incubación.....	27
8 Resultados	29
8.1 Condiciones óptimas de reproducción <i>Galleria mellonella</i>	29
8.2 Biodegradación de polímeros de <i>Galleria mellonella</i>	31
8.3 Variación en el peso de la excreta con dieta de polímeros	32
8.4 Área de consumo de polímeros.....	34
8.5 Análisis por espectroscopía infrarroja (FTIR) del PP	36

8.6 Picos característicos del LDPE y PP	36
8.7 LDPE: evidencia clara de oxidación y degradación	37
8.8 Análisis por espectroscopía infrarroja (FTIR) del PP	40
9 Discusión..	43
9.1 Condiciones óptimas de reproducción <i>Galleria mellonella</i>	43
9.2 Biodegradación de polímeros de <i>Galleria mellonella</i> y variación en el peso de la excreta con dieta de polímeros	44
9.3 Área de consumo de polímeros.....	46
9.4 Análisis por espectroscopía infrarroja.....	48
9.5 Diferenciación espectral y susceptibilidad oxidativa en poliolefinas: contraste entre LDPE y PP.....	51
10 Conclusiones	53
11 Referencias.....	56
12 Anexos.....	60

Lista de figuras

Figura 1	<i>Ubicación y Obtención de la Larva Galleria mellonella.</i>	21
Figura 2	<i>Mortalidad semanal de Galleria mellonella por tipo de polímero</i>	30
Figura 3	<i>Tendencia semanal en el peso de la excreta de Galleria mellonella</i>	33
Figura 4	<i>Tendencia semanal del área de consumo de polímero por Galleria mellonella.</i>	35
Figura 5	<i>Estabilidad química del LDPE frente a la exposición biológica.</i>	39
Figura 6	<i>Estabilidad química del PP frente a la exposición biológica.</i>	41

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Leyes, decretos y resoluciones relacionados con la experimentación de lepidópteros y el uso de los plásticos en Colombia</i>	23
Tabla 2 <i>Dieta artificial para la reproducción de la <i>Galleria mellonella</i></i>	25
Tabla 3 <i>Mortalidad de <i>Galleria mellonella</i></i>	29
Tabla 4 <i>Variaciones en el peso de la excreta de <i>Galleria mellonella</i></i>	32
Tabla 5 <i>Consumo de polímero de <i>Galleria mellonella</i> en tres semanas de experimentación</i> ...	34
Tabla 6 <i>Identificación y asignación de las principales bandas de absorción en el espectro FTIR del polietileno de alta densidad (LDPE)</i>	37
Tabla 7 <i>Identificación y asignación de las principales bandas de absorción en el espectro FTIR del polipropileno (PP)</i>	40

Resumen

La acumulación de plásticos es uno de los desafíos ambientales más alarmantes en la actualidad, debido a su prolongado tiempo de descomposición. Ante este escenario, el propósito del presente estudio fue determinar la tasa de biodegradación de polímeros (LDPE, PP) usando larvas de *Galleria mellonella* provenientes del Putumayo, en condiciones de laboratorio controladas durante un periodo de tres semanas.

La investigación se llevó a cabo con tres tipos de tratamiento experimental: alimentación con LDPE, con PP y con una dieta artificial como tratamiento de control. A lo largo de la investigación, se registraron variables como la mortalidad larvaria, la superficie de plástico consumida y la producción de excretas. Con estos datos fue posible observar en qué medidas las larvas ingerían los polímeros y si realmente podían aprovecharlos metabólicamente. Los resultados mostraron que las larvas que consumieron LDPE tuvieron una mayor tasa de supervivencia, consumieron más plástico y produjeron más residuos en comparación con las alimentadas con PP. El análisis FTIR también reveló cambios químicos en el LDPE, en particular la aparición de grupos funcionales como carbonilos e hidroxilos, lo que indica que las cadenas de polímeros comenzaron a descomponerse. Por otro lado, el PP solo presentó cambios menores y se relacionó con una mayor tasa de mortalidad entre las larvas, por lo que se concluyó que la investigación proporciona información esencial que demuestra cómo organismos específicos contribuirán a la creación de nuevos métodos de remediación ambiental ante la latente problemática relacionada con la permanencia y degradación de los plásticos.

Palabras claves

Biodegradación, contaminación, espectroscopía infrarroja (FTIR), *Galleria mellonella*, Polímeros. Plástico

Abstract

The accumulation of plastics is one of the most alarming environmental challenges today, due to their prolonged decomposition time. Given this scenario, the purpose of this study was to determine the biodegradation rate of polymers (LDPE, PP) using *Galleria mellonella* larvae from Putumayo, under controlled laboratory conditions over a three-week period.

The research was conducted with three types of experimental treatment: feeding with LDPE, with PP, and with an artificial diet as a control. Throughout the study, variables such as larval mortality, the surface area of plastic consumed, and excreta production were recorded. These data allowed researchers to observe the extent to which the larvae ingested the polymers and whether they could actually utilize them metabolically.

The results showed that the larvae that consumed LDPE had a higher survival rate, consumed more plastic, and produced more waste compared to those fed with PP. FTIR analysis also revealed chemical changes in LDPE, particularly the appearance of functional groups such as carbonyls and hydroxyls, indicating that the polymer chains had begun to decompose. PP, on the other hand, showed only minor changes and was associated with a higher mortality rate among the larvae. Therefore, the research concluded that it provides essential information demonstrating how specific organisms will contribute to the development of new environmental remediation methods to address the ongoing problem of plastic persistence and degradation.

1 Introducción

La acumulación masiva de residuos plásticos como el polietileno de baja densidad (LDPE) y el polipropileno (PP) representa una crisis de contaminación ambiental global (Geyer et al., 2017). En Colombia, esta problemática se ha acentuado debido a la cantidad considerable de los desechos mencionados, lo que impacta de manera negativa los ecosistemas, sobre todo por la acumulación de los desechos sólidos. Además, se debe considerar que estos polímeros tienen una alta resistencia a la degradación natural (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Ante esta situación, resulta indispensable proponer soluciones sostenibles y eficientes para la gestión y la degradación de plásticos, lo que permita mitigar su impacto ambiental adverso y promover la conservación de los recursos naturales. Así, una de las alternativas biológicas que ha surgido en los últimos tiempos es el uso de larvas de *Galleria mellonella*, conocidas comúnmente como polillas de cera. Estas tienen la capacidad de biodegradar y consumir diversos polímeros plásticos, lo que las convierte en agentes potenciales determinantes para el abordaje de la grave problemática de contaminación (Realpe-Aranda et al., 2007).

De esa forma, diversos estudios han demostrado cómo las larvas pueden descomponer el PP en condiciones de laboratorio, lo que brinda la posibilidad de diseñar estrategias de biorremediación. No obstante, es indispensable profundizar en el conocimiento sobre su efectividad en la degradación de múltiples tipos de PP, a fin de evaluar las posibilidades de crear subproductos a través de este proceso.

En consecuencia, la investigación planteada tiene su enfoque en la evaluación de la tasa de biodegradación de LDPE y PP por las larvas de *Galleria mellonella* en condiciones de laboratorio, por lo que se estudian diversos factores que pueden influir en la eficiencia de la degradación, como la temperatura, la humedad y la concentración de polímeros (Márquez,

2019). Asimismo, se pretende analizar los diversos subproductos que pueden elaborarse durante el proceso de biodegradación, a fin de garantizar que estos no representen un riesgo adicional para el medioambiente.

En suma, la investigación tiene como objetivo principal aportar una solución biotecnológica que contribuya a la mitigación del impacto ambiental negativo generado por residuos plásticos. Por ende, para comprender mejor los mecanismos de degradación de las larvas de *Galleria mellonella* (Velazco, 2017), se desarrollan estrategias eficientes y sostenibles para la gestión de dichos materiales, a fin de promover un futuro más limpio y saludable para el planeta.

2 Marco teórico

La *Galleria mellonella* L. es identificada como un organismo nocivo que perjudica a nivel mundial a las abejas productoras de miel, pues genera la desaparición de colmenas, el desplazamiento y la reducción de agrupaciones. Su relevancia económica se asocia con la nutrición de las larvas y la excavación de galerías dentro de los panales. Estas larvas ingieren cera, polen, resinas, así como residuos de abejas, y su crecimiento está condicionado por la humedad ambiental y el régimen alimenticio (Restrepo-García et al., 2019).

Pese a constituir una dificultad para la apicultura, la *G. mellonella* igualmente se utiliza como modelo experimental en investigaciones de fisiología de insectos, genómica y proteómica. De igual forma, sus larvas poseen importancia comercial como recurso alimenticio para fauna y se emplean como huéspedes sustitutos en la obtención de parasitoides y agentes de control biológico.

El incremento en la exigencia de plaguicidas específicos ha promovido la implementación del manejo integrado mediante acciones agronómicas, conductuales y biológicas. Neira (s.f.) indicó que el desarrollo de la *G. mellonella* cambia según la temperatura, al fluctuar entre los 30 y 60 días a 22 °C y al reducirse cuando esta se incrementa. No obstante, no se ha estudiado de manera exhaustiva su incidencia en cada fase del desarrollo en contextos distintos a los naturales.

El análisis de la influencia térmica en los estadios de crecimiento de los insectos es fundamental para formular estrategias de producción y regulación. En el caso de la *G. mellonella*, esta posibilita calcular su evolución bajo diferentes condiciones térmicas. En este marco, la investigación tuvo como finalidad establecer el impacto de la temperatura sobre su ciclo biológico en ambiente controlado.

Por su parte, Lewanga et al. (2018) demostraron que microorganismos del tracto digestivo de *Lumbricus terrestris* descompusieron el 60 % del polietileno de baja densidad en

un periodo de 21 días, al emplear el carbono del material como principal fuente de energía, aunque se identificaron nanoplásticos al concluir el ensayo.

En suma, se ha reportado que *G. mellonella* es capaz de descomponer 0.8 mg de polietileno en un lapso de 12 horas. Sin embargo, dada la variedad de investigaciones existentes, resulta necesario analizar las consecuencias de plantear a esta especie como alternativa frente a la problemática de los residuos plásticos.

3 Marco conceptual

3.1 Biología y Ecología de *Galleria mellonella*

La *Galleria mellonella* corresponde a un insecto perteneciente al orden de los lepidópteros dentro del suborden Glossata. Esta se caracteriza por ser una mariposa de tonalidad parda, cuya ala anterior presenta una franja oscura alargada en la zona central, mientras que las alas posteriores exhiben una coloración grisácea. “La hembra mide entre 20 y 30 mm de punta a punta de las alas extendidas, y el macho. La larva es una oruga de color blanco, un poco oscura por la espalda, con la cabeza de color marrón, miden hasta 28 a 30 mm” (Velasco, 2017 como se citó en Jiménez, 2019, p. 13).

Las larvas pasan por entre 8 y 10 procesos de ecdisis y generan filamentos de seda en cada etapa, aunque únicamente en la fase final elaboran el capullo. Después se convierten en pupas de tonalidad marrón oscuro rojiza y permanecen inmóviles. Los individuos machos presentan menor tamaño y coloración más tenue que las hembras, mientras que estas poseen una probóscide dividida y palpos labiales más prominentes, a diferencia de los machos que los tienen redondeados (Jiménez, 2019).

El desarrollo vital de *G. mellonella* se extiende entre 40 y 60 días a 21 °C. La hembra, luego de 2 o 3 días tras la fecundación, coloca más de 500 huevos de cerca de 1 mm. Estos abren entre los 15 y 20 días, construyen el capullo entre los 21 y 25 días y los adultos aparecen después de 10 a 15 días (Realpe-Aranda et al., 2007).

Ciclo Reproductivo

Huevo: la hembra adulta coloca los huevos en superficies apropiadas, como cera de abeja, fuentes nutritivas ricas en proteínas o fisuras y cavidades. Estos huevos son de tamaño reducido, forma elíptica y coloración blanquecina (Realpe-Aranda et al., 2007).

Larva: después del periodo de incubación, surgen larvas de color blanco crema con cuerpo alargado y segmentado. En esta fase consumen activamente cera, miel, polen y otras

fuentes ricas en proteínas, y atraviesan varias mudas durante su desarrollo (Realpe-Aranda et al., 2007).

Prepupa: previo al estado pupal, la larva ingresa en la fase de prepupa, donde cesa su alimentación y se dispone a la metamorfosis mediante transformaciones internas fisiológicas y estructurales, como la reorganización tisular (Realpe-Aranda et al., 2007).

Pupa: posteriormente, la larva pasa al estado de pupa dentro de un capullo de seda, donde ocurre la metamorfosis total. Presenta tonalidad marrón clara y forma oval, con cambios internos relevantes que posibilitan su transición al estado adulto (Realpe-Aranda et al., 2007).

Taxonomía de *Galleria Mellonella*

En primer lugar, Márquez (2019) señaló que *G. mellonella* corresponde a un lepidóptero de la familia Pyralidae. Sus larvas son de tipo eruciforme, con seis patas en el tórax y pseudopatas en el abdomen. Asimismo, es un insecto holometábolo que se desarrolla en cuatro etapas: huevo, larva, pupa y adulto (Smith, 2014; Kwadha et al., 2017).

El desarrollo vital fluctúa desde semanas hasta meses debido a la influencia de condiciones bióticas y abióticas. Las larvas pueden demorar entre 28 días y 6 meses antes de transformarse en pupa, y presentan tonalidad blanquecina y cabeza rojiza con mandíbulas apicales bien formadas. La hembra coloca entre 50 y 150 huevos por oviposición en fisuras de la colmena, con lo que alcanza entre 250 y 300 durante su vida (Ellis et al., 2013).

Los huevos presentan dimensiones promedio de 0.478 mm de longitud y 0.394 mm de ancho, mientras que las larvas recién emergidas miden entre 1 y 3 mm. En fases más desarrolladas, las larvas alcanzan entre 25 y 30 mm, y las pupas entre 12 y 20 mm, con grosores de 5 a 7 mm (Paddock, 1918; Smith, 2014).

Los individuos adultos muestran dimorfismo sexual: la hembra posee entre 15 y 20 mm de longitud, además de mayor masa y tamaño que el macho. Los machos sobreviven entre 21 y 30 días, mientras que las hembras lo hacen entre 8 y 15 días. Estas características dependen de la dieta y de factores ambientales como la temperatura (Márquez, 2019).

En condiciones controladas, las larvas consumen miel, glicerol, levadura, cera y afrecho de trigo. La temperatura más adecuada para su crecimiento es de 25 °C, aunque intervalos de 29 °C a 33 °C también resultan favorables. La mayor intensidad de alimentación se presenta en las primeras fases larvales (Realpe et al., 2007; Nielsen y Brister, 1979; Márquez, 2019).

Plástico

Los plásticos corresponden a compuestos sintéticos con capacidad de moldeado y alta resistencia a la descomposición, constituidos por polímeros de largas cadenas moleculares. Su uso se ha extendido ampliamente en la sociedad actual, al abarcar desde empaques hasta aplicaciones industriales y médicas (Smith, 2014).

3.2 Polilla de la cera

La *Galleria mellonella* L. corresponde a un insecto lepidóptero del suborden Glossata, reconocido globalmente como organismo perjudicial para *Apis mellifera*. Presenta dimorfismo sexual: las hembras alcanzan entre 20 y 30 mm, mientras que los machos son más pequeños y de tonalidad más clara. Las alas anteriores son pardas con marcas oscuras y las posteriores grisáceas; las hembras poseen probóscide dividida y palpos proyectados hacia adelante, a diferencia de los machos (Velasco, 2017 como se citó en Jiménez, 2019; Jorjão et al., 2018).

Las larvas de *Galleria mellonella* exhiben una tonalidad blanquecina con región dorsal más oscura y cabeza parda, alcanzando longitudes de hasta 30 mm. A lo largo de su crecimiento atraviesan entre 8 y 10 ecdisis y generan seda en cada etapa, aunque únicamente en la fase final elaboran el capullo en el que se transforman en pupas de color marrón rojizo (Jorjão et al., 2018).

El desarrollo vital está influenciado principalmente por la temperatura; de 21 °C a 22 °C se extiende entre 40 y 60 días. Las hembras colocan más de 500 huevos luego de 2 o 3 días, los cuales emergen entre 15 y 20 días; posteriormente, las larvas construyen el capullo entre los días 21 y 25 y los adultos aparecen tras 10 o 15 días adicionales. No obstante, aún se

requiere profundizar en la incidencia térmica en cada fase fuera de condiciones naturales (Realpe et al., 2007; Neira, s.f.).

Las infestaciones numerosas de estas larvas ocasionan efectos graves, como la desaparición de colonias, el desplazamiento de abejas y la disminución de enjambres. Se nutren de cera, polen, propóleos y restos de abejas, por lo que forman galerías que afectan la estructura de las colmenas. Además, su crecimiento está condicionado por factores como la humedad y la alimentación (Restrepo-García et al., 2019).

Aun cuando es considerada una plaga, *Galleria mellonella* se emplea como modelo experimental en investigaciones de fisiología, genómica y proteómica. Sus larvas poseen valor económico como alimento y se utilizan como huéspedes alternativos para la producción de parasitoides, por lo que promueven el manejo integrado de plagas (Neira, s.f.).

En el ámbito biotecnológico, esta especie resalta por su habilidad para descomponer plásticos como el polietileno, con evidencias de reducción considerable en pocas horas. Aunque no se ha establecido si esta capacidad proviene del insecto o de su microbiota intestinal, estos hallazgos abren oportunidades para mitigar la contaminación por plásticos (Bombelli et al., 2017; Lwanga et al., 2018).

En conclusión, el ciclo de *Galleria mellonella* se ve favorecido por su capacidad de consumir cera, miel y polen, sustancias ricas en lípidos. Si bien en su fase larval afecta los panales al excavar túneles, esta misma capacidad metabólica sugiere un potencial aprovechamiento en aplicaciones biotecnológicas (Salas, 2015; Bombelli et al., 2017).

3.3 LDPE

El LDPE es un polímero termoplástico que pertenece a la familia de las poliolefinas; este se utiliza ampliamente a nivel industrial y doméstico debido a su flexibilidad, resistencia a la humedad y facilidad de procesamiento. Este tipo de PE se caracteriza por su estructura molecular altamente ramificada, lo que impide que las cadenas de polímero se empaquen de

forma ordenada, y ello resulta en una densidad más baja y una menor cristalinidad en comparación con otros tipos, como el polietileno de alta densidad (HDPE) (Andrady y Neal, 2009).

Químicamente, el LDPE está compuesto por largas cadenas de etileno (C_2H_4) polimerizadas. La unidad básica es el monómero de etileno, que al unirse forma el polímero mediante enlaces covalentes tipo C-C y C-H, y su fórmula empírica puede expresarse como $(C_2H_4)_n$, donde “n” representa el número de unidades repetidas. Por otro lado, las ramificaciones laterales de su estructura impiden una alineación compacta de las cadenas, lo que da como resultado un material más flexible, con un punto de fusión entre los 105° C y 115° C (Chandra y Rustgi, 1998; Tang et al., 2020).

Igualmente, el LDPE se utiliza comúnmente en la fabricación de bolsas plásticas, envoltorios, películas de embalaje, botellas exprimibles y componentes eléctricos. Sin embargo, su uso masivo también ha contribuido a la acumulación de residuos plásticos de difícil degradación en el medioambiente, lo que ha generado preocupación global respecto a su impacto ecológico. Por eso, dada su persistencia en el ambiente, investigaciones recientes han explorado alternativas biotecnológicas para su degradación, entre ellas el uso de insectos como la *Galleria mellonella*, cuya capacidad para degradar este tipo de plástico se ha atribuido a enzimas propias o a la acción de bacterias simbióticas en su sistema digestivo (Bombelli et al., 2017; Lwanga et al., 2018)

3.4 PP

El PP es un polímero termoplástico perteneciente al grupo de las poliolefinas, ampliamente utilizado en la industria por su versatilidad, bajo costo y resistencia química. Este se desarrolló por primera vez en la década de 1950 mediante la polimerización del monómero propileno (C_3H_6), un hidrocarburo insaturado que forma parte de los productos derivados del petróleo (Mooney, 2009).

En cuanto a su estructura, desde el punto de vista químico, el PP está formado por cadenas largas de unidades repetidas de propileno, cuya fórmula estructural básica es $-\text{[CH}_2\text{-CH(CH}_3\text{)]}_n\text{-}$. En esta, cada unidad monomérica contiene un grupo metilo ($-\text{CH}_3$) unido al segundo átomo de carbono, lo cual influye en sus propiedades físicas y mecánicas. Además, el tipo de configuración estereoquímica (isotáctica, atáctica o sindiotáctica) afecta su grado de cristalinidad, por lo que el PP isotáctico es el más común en aplicaciones comerciales, dadas su alta resistencia y su estabilidad térmica (Chanda y Roy, 2007).

Asimismo, el PP es resistente a la humedad y a la mayoría de los productos químicos, y presenta buena estabilidad térmica, con un punto de fusión aproximado de 160°C a 170°C . Estas propiedades lo hacen ideal para la fabricación de envases, textiles, componentes automotrices, dispositivos médicos y productos de uso doméstico. De igual forma, su bajo peso específico y su capacidad para reciclarse lo posicionan como un material atractivo desde el punto de vista económico y ambiental (Ehrenstein, 2001).

Sin embargo, al igual que otros plásticos sintéticos, el PP es altamente resistente a la degradación natural, lo que contribuye a la contaminación ambiental. Por ello, investigaciones recientes también han comenzado a explorar su posible biodegradación mediante la acción de microorganismos o insectos, aunque los resultados son aún incipientes comparados con los del PE (Shah et al., 2008).

3.5 Biodegradación

En el caso de Márquez (2019), se conceptualizó la biodegradabilidad como la facultad de un material para desintegrarse a través de mecanismos naturales. Este fenómeno comienza con la fotooxidación de los polímeros y prosigue con la intervención de microorganismos sobre sus estructuras, liberando segmentos de carbono utilizables en sus rutas metabólicas (Lindbergh et al., 1995).

Como consecuencia, los plásticos se deterioran, reducen su resistencia y se fragmentan en partículas diminutas denominadas microplásticos. La biodegradación facilita la transformación de la materia en nutrientes reutilizables, con lo que se procura que los subproductos no resulten tóxicos y se incorporen a ciclos biogeoquímicos como los del carbono, nitrógeno y azufre (Sivan, 2011; Eskander y Saleh, 2017; Singh y Sharma, 2008).

4 Marco contextual

El sitio de investigación se localiza en Puerto Colón, en la vereda El Sabalito, perteneciente al municipio de San Miguel (Putumayo), dentro de la región amazónica de Colombia, cuyas condiciones naturales inciden en las dinámicas ecológicas, productivas y sociales.

Desde la perspectiva climática, este lugar se caracteriza por un entorno cálido y húmedo, con temperaturas que oscilan entre los 24 °C y 30 °C y escasa variabilidad térmica. Este contexto favorece el desarrollo de múltiples organismos, como insectos y microorganismos.

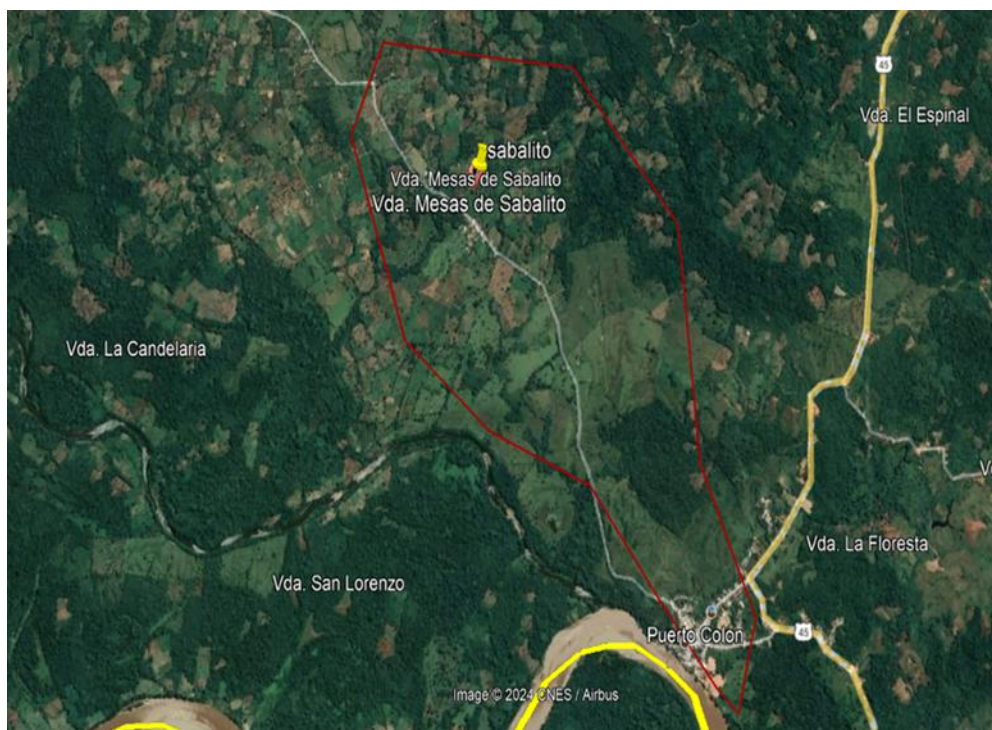
La región presenta precipitaciones constantes y bien distribuidas, con promedios diarios cercanos a 4.3 mm, lo que mantiene elevados niveles de humedad relativa. Esto repercute directamente en la dinámica de los ecosistemas y en los procesos de descomposición y degradación.

Asimismo, el área dispone de abundante vegetación y recursos hídricos, lo que promueve una gran diversidad biológica. Estas condiciones resultan adecuadas para organismos con potencial biotecnológico como la *Galleria mellonella*, destacada por su capacidad para descomponer polímeros.

Finalmente, en el ámbito socioeconómico, la base económica se sustenta en actividades del sector primario como la apicultura, la ganadería y la agricultura, por lo que sobresalen cultivos como el plátano, la yuca, el maíz y el cacao, los cuales dependen estrechamente de las condiciones naturales del entorno.

Figura 1

Ubicación y Obtención de la Larva Galleria mellonella.



Nota. Ubicación de la obtención de la polilla de cera *Galleria mellonella*

5 Marco legal

Tabla 1

Leyes, decretos y resoluciones relacionados con la experimentación de lepidópteros y el uso de los plásticos en Colombia

Ley, decreto y resolución	Concepto
Ley 050 de 2019	Define disposiciones orientadas a disminuir la fabricación y la utilización de plásticos de un solo uso en el territorio nacional, e introduce un esquema de transición para su sustitución gradual por opciones reutilizables, biodegradables u otras con capacidad de descomposición.
Decreto 1376 de 2013	Norma la obtención de ejemplares con propósitos investigativos.
Resolución 1397 de 2018	Controla el uso de bolsas plásticas e incorpora la entrega de bolsas diferenciadas por color en los puntos de pago de los comercios.
Documento CONPES 2750 de 1994	Fija lineamientos para la administración de desechos sólidos.
Norma Técnica Colombiana 6130	Unifica la terminología empleada en el campo de envases, embalajes y empaques plásticos, así como en la gestión integral de residuos.
Resolución 1407 de 2018	Determina la administración ambiental de envases y empaques, muchos de ellos fabricados con materiales plásticos como LDPE y PP.
Decisión Andina 391 de 1996	Reglamenta el acceso a los recursos genéticos y a sus componentes derivados.

6 Objetivo

6.1 Objetivo general

Evaluar la tasa de biodegradación de polímeros (LDPE, PP) mediante el uso de larvas de *Galleria mellonella* en un entorno de laboratorio controlado.

6.2 Objetivos específicos

1. Establecer las condiciones óptimas para la reproducción exitosa de colonias de *Galleria mellonella*.
2. Determinar la tasa de biodegradación de polímeros por la larva *Galleria mellonella* bajo condiciones controladas de laboratorio.
3. Cuantificar el consumo de polímero de las larvas de *Galleria mellonella* mediante técnicas de laboratorio orientados a evaluar la reducción del plástico original.

7 Materiales y métodos

La investigación se desarrolló con el objetivo de evaluar la capacidad de biodegradación de los polímeros LDPE y PP mediante el uso de larvas de *Galleria mellonella*. El enfoque experimental consideró variables relacionadas con el tipo de polímero, el consumo por parte de las larvas y los cambios estructurales asociados al proceso de degradación.

7.1 Obtención y cría de larvas

Para dar cumplimiento al primer objetivo, esto es, establecer las condiciones óptimas para la reproducción de los individuos, cabe señalar que las larvas se colectaron en la vereda El Sabalito del municipio de San Miguel, Putumayo, y fueron suministradas por un apicultor local. Además, las condiciones climáticas de la zona presentaron temperaturas entre los 22° C y 26° C y una precipitación anual de 3000 mm.

De otra parte, la cría y el desarrollo de las larvas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Biología de la Institución Universitaria del Putumayo. El proceso se realizó en cajas Dadant, donde las larvas se alimentaron con una dieta artificial especialmente formulada para garantizar un entorno nutricional adecuado y equilibrado. La composición detallada de estas se encuentra en la Tabla 1.

Finalmente, la alimentación se administró durante dos semanas consecutivas. Para ello, se suministraron 500 gr de sustrato semanal, el cual se distribuyó dentro de los espacios de reproducción. Así, al ingresar el sustrato, este cubría completamente a las larvas para minimizar el estrés y el impacto en su reproducción y su desarrollo.

Tabla 2

*Dieta artificial para la reproducción de la *Galleria mellonella**

Ingredientes	Cantidad (gr)
Salvado de trigo	464
Levadura	69
Cera de abeja	67

Glicerina	207
Miel de abeja	39
Total	1000

Nota. La tabla presenta la composición de la dieta artificial utilizada para la reproducción de *Galleria mellonella*, elaborada a partir de una mezcla de salvado de trigo, levadura, cera de abeja, glicerina y miel de abeja, con un peso total de 1000 gr.

7.1.1 Diseño experimental y monitoreo

El estudio se diseñó para evaluar el potencial biodegradador de la *Galleria mellonella* al someter las larvas a una dieta experimental compuesta únicamente de polímeros. Para establecer las unidades de prueba, se prepararon muestras de 15 gr de cada tipo de polímero por unidad experimental, específicamente LDPE y PP. Estos materiales se fragmentaron previamente para maximizar la superficie de contacto y facilitar la interacción y el consumo por parte de las larvas. Así, el experimento inició el lunes 13 de mayo a las 9:00 a. m., cuando se introdujeron 15 gr de PE y 15 gr de PP en las respectivas cajas de cría, cada una con 200 larvas de *Galleria mellonella*. Para ello, se establecieron tres tratamientos experimentales:

1. Grupo control: larvas alimentadas exclusivamente con dieta artificial.
2. Tratamiento LDPE: larvas alimentadas con LDPE.
3. Tratamiento PP: larvas alimentadas con PP.

7.1.2 Monitoreo del experimento

El seguimiento se realizó en cuatro momentos clave:

- ☐ Día 0: inicio del experimento.
- ☐ Día 7: primera evaluación.
- ☐ Día 14: segunda evaluación.
- ☐ Día 21: fin del experimento.

De ese modo, durante cada evaluación se verificó la mortalidad larval, por lo que se retiraron los individuos muertos para evitar contaminación. Asimismo, se eliminaron las crisálidas formadas en las etapas finales con el fin de impedir que las polillas emergentes dejaran de consumir el sustrato experimental. Luego, a partir del día 7 y en cada semana del ensayo, se registraron los siguientes parámetros:

- ☐ Área del polímero consumido.
- ☐ Peso de las excretas producidas por las larvas.
- ☐ Mortalidad larval acumulada.

Estos procedimientos se repitieron semanalmente hasta completar 21 días de exposición. Además, los pesajes se realizaron utilizando una balanza analítica Vansolix AB-265S, con precisión de 0.001 gr. Paralelamente, el área consumida de los polímeros se midió con hojas milimetradas y una regla metálica para garantizar precisión en las mediciones superficiales.

7.2 Análisis del consumo y la biodegradación

Durante cada punto de muestreo se recolectaron las heces producidas por las larvas para su posterior análisis. A su vez, los cambios en el área consumida del polímero se emplearon como indicadores indirectos de degradación. Igualmente, las muestras del polímero y de las excretas se analizaron mediante espectroscopía infrarroja (FTIR) en el Laboratorio de Análisis Industriales de la Facultad de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad del Valle, con el objetivo de detectar alteraciones químicas en la estructura molecular de los polímeros.

7.2.1 Condiciones de incubación

Las larvas se mantuvieron en cajas Dadant bajo condiciones controladas:

- ☐ Temperatura: 24° C.
- ☐ Fotoperiodo: régimen intercalado.

- Días con oscuridad: lunes, miércoles, viernes y domingo.
- Días con luz: martes, jueves y sábado.
- Duración total: un mes y una semana.

Este esquema se implementó considerando que el comportamiento y el desarrollo de las poblaciones de insectos pueden verse influenciados por la disponibilidad de luz.

8 Resultados

8.1 Condiciones óptimas de reproducción *Galleria mellonella*

El presente apartado detalla los hallazgos obtenidos durante la investigación, los cuales se orientaron a establecer las condiciones óptimas para la reproducción exitosa de *Galleria mellonella*. Cabe señalar aquí que, a pesar de que el objetivo principal se enfocó en la reproducción, la fase inicial del estudio requirió evaluar la adaptabilidad y la supervivencia de las larvas en condiciones experimentales específicas, especialmente al exponerse a la ingesta de polímeros como el PP y el LDPE. De esa forma, durante las tres semanas de experimentación, se registró la mortalidad de la *Galleria mellonella* para evaluar su adaptabilidad y su supervivencia al consumir dos tipos de polímeros. Este seguimiento permitió analizar la capacidad de las larvas para tolerar y metabolizar los materiales, con lo que se identificaron diferencias en su respuesta frente al PP y el LDPE. Así las cosas, los datos obtenidos proporcionaron información clave sobre la viabilidad larval y los efectos fisiológicos asociados a la ingesta de cada polímero, con lo que se contribuyó a entender su potencial como agentes de biodegradación.

Tabla 3

*Mortalidad de *Galleria mellonella*.*

Semana	LDPE	PP
1	2	20
2	10	9
3	2	21
Total	19	50

Nota. La tabla muestra el número de larvas de *Galleria mellonella* muertas registradas durante tres semanas de experimentación con LDPE y PP, lo cual evidencia la mortalidad correspondiente para cada tratamiento.

De esa manera, en la primera semana de exposición se observó una marcada diferencia entre los tratamientos, pues el PP registró una alta mortalidad (20 muertes; 13.3 %),

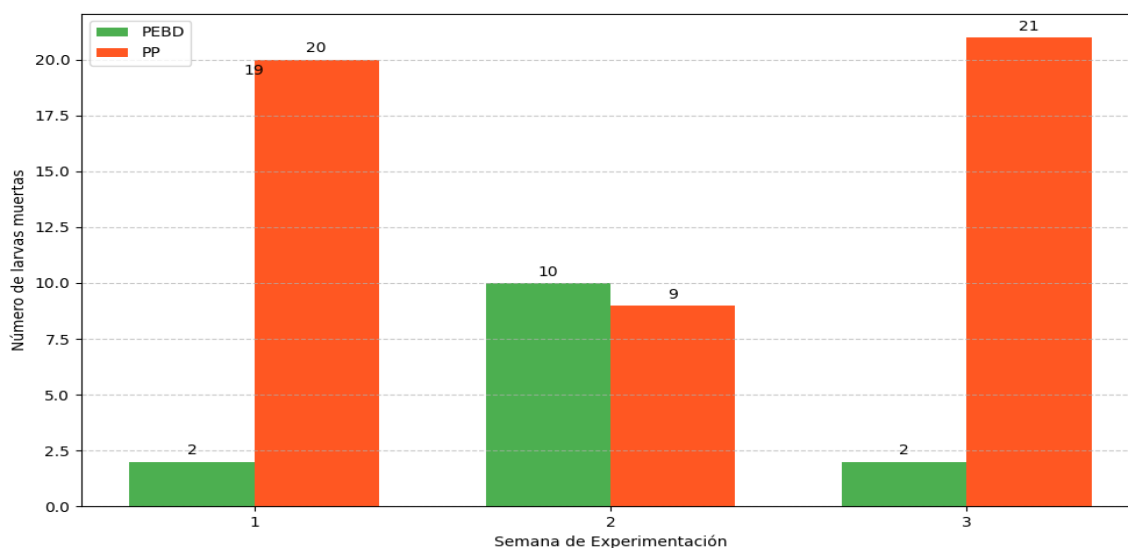
lo que sugiere una mayor rigidez estructural que dificulta su procesamiento digestivo, una liberación rápida de compuestos tóxicos (aditivos, plastificantes) y un estrés fisiológico agudo en el tracto digestivo larval. Mientras tanto, el LDPE presentó una mortalidad significativamente menor (2 muertes; 1.1 %), lo que indica mayor biocompatibilidad inicial, menor liberación de compuestos nocivos y mejor adaptación temprana de las larvas al sustrato.

En cuanto a la segunda semana, se evidenció un cambio en los patrones de mortalidad, con una reducción en el PP a 9 muertes (6 %), lo que sugiere una posible adaptación metabólica de las larvas supervivientes y la eliminación temprana de individuos más susceptibles, mientras que en el LDPE hubo un pico de mortalidad con 10 muertes (5.5 %), atribuible a la acumulación de subproductos no excretados derivados de la degradación del polímero, estrés metabólico transitorio y alteraciones en la composición de la microbiota intestinal.

Más adelante, en la tercera semana, se revelaron efectos diferenciados a largo plazo, donde el PP presentó la máxima mortalidad registrada (21 muertes; 14 %), lo que indica un daño acumulativo en el tracto digestivo, deficiencias nutricionales por baja asimilación del polímero y efectos de toxicidad crónica, mientras que el LDPE mantuvo una mortalidad mínima (2 muertes; 1.1 %), similar a la primera semana, lo que demuestra alta biocompatibilidad sostenida, adaptación metabólica exitosa y menor acumulación de daño fisiológico.

Figura 2

Mortalidad semanal de Galleria mellonella por tipo de polímero



Nota. La figura muestra la mortalidad semanal de *Galleria mellonella* durante tres semanas de exposición a polipropileno (PP) y polietileno de baja densidad (LDPE). En la primera semana, el PP registró la mayor mortalidad (20 individuos; 13,3 %), mientras que el LDPE presentó una mortalidad mínima (2 individuos; 1,1 %). En la segunda semana, la mortalidad en PP disminuyó (9 individuos; 6 %), mientras que en LDPE se observó un incremento temporal (10 individuos; 5,5 %). En la tercera semana, el PP alcanzó la mayor mortalidad acumulada (21 individuos; 14 %), en contraste con el LDPE, que mantuvo valores bajos (2 individuos; 1,1 %). Estos resultados evidencian una mayor estabilidad fisiológica y adaptación larval frente al LDPE, mientras que el PP generó efectos acumulativos asociados a mayor estrés metabólico y posible toxicidad crónica.

8.2 Biodegradación de polímeros de *Galleria mellonella*

Esta sección presenta los hallazgos experimentales generados a partir de la experimentación, cuyo objetivo específico fue determinar la tasa de biodegradación de polímeros por la larva *Galleria mellonella* a partir de variaciones en el peso de la excreta y el área de consumo de los polímeros.

8.3 Variación en el peso de la excreta con dieta de polímeros

Este estudio comparativo reveló diferencias sustanciales en el procesamiento de LDPE y PP a lo largo de tres semanas de experimentación.

Tabla 4

Variaciones en el peso de la excreta de Galleria mellonella.

Semana	LDPE (gr)	PP (gr)
1	0.6995	0.5004
2	0.2772	0.2983
3	0.1236	0.1194
Total	1.1003	0.9181

Nota. La tabla muestra la cantidad de excreta producida por la *Galleria mellonella* durante tres semanas de experimentación con LDPE y PP. Con ello, se observa una disminución progresiva en la producción de excretas a lo largo del tiempo en ambos tratamientos, pero esta fue ligeramente mayor en el tratamiento con LDPE.

Ahora bien, en la primera semana se observó una marcada diferencia en la excreción larval con valores significativamente mayores para el LDPE (0.6995 gr) frente al PP (0.5004 gr). Esta diferencia inicial sugiere que las larvas procesan eficientemente el LDPE probablemente debido a su menor grado de densidad, lo que facilita la acción de las enzimas digestivas; y a una estructura molecular más abierta, lo que indica que el LDPE ofrece mayor accesibilidad para los sistemas metabólicos de *Galleria mellonella* en comparación con el PP.

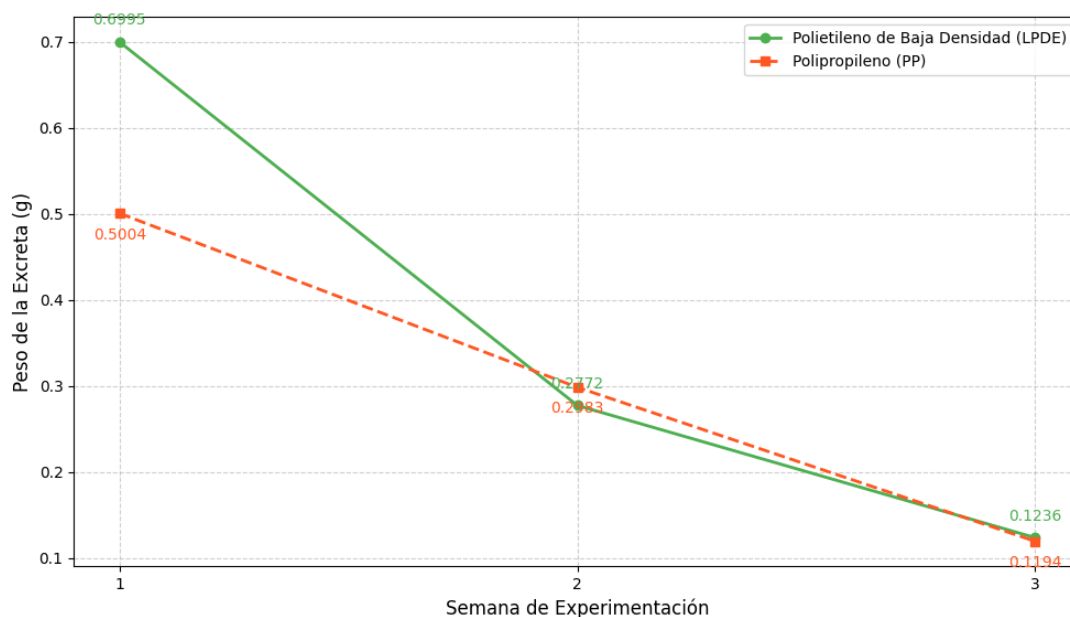
La segunda semana mostró un cambio notable en los patrones de excreción con una drástica reducción del 60.4 % para el LDPE (0.2772 gr) y del 40.4 % para el PP (0.2983 gr). Esta disminución simultánea podría reflejar diversos fenómenos, como una adaptación metabólica de las larvas a los sustratos de polímeros, una reducción en la eficiencia de degradación conforme avanzaba el experimento, o cambios en el comportamiento alimenticio asociados al desarrollo larval. Por tanto, es particularmente interesante observar cómo el PP, que inicialmente se vio menos degradado, alcanzó niveles similares al LDPE en esta fase

intermedia, lo que sugiere que la mayor resistencia inicial del PP podría superarse con el tiempo de exposición.

Para terminar, se debe señalar que en la fase final los valores de excreción alcanzaron un equilibrio notable entre ambos tratamientos (LDPE: 0.1236 gr; PP: 0.1194 gr), lo que evidencia la existencia de un límite fisiológico en la capacidad de degradación de las larvas determinado por los cambios metabólicos asociados a la preparación del tracto digestivo para la metamorfosis y la posible saturación de los sistemas enzimáticos responsables de la biodegradación, por lo que se observa que el comportamiento similar en esta etapa terminal sugiere que, más allá de las diferencias iniciales en la degradabilidad de los polímeros, las larvas convergen hacia una capacidad máxima común de procesamiento al final de su ciclo larval.

Figura 3

Tendencia semanal en el peso de la excreta de Galleria mellonella



Nota. La figura muestra la variación semanal en el peso de la excreta producida por *Galleria mellonella* alimentada con LDPE y PP durante tres semanas de experimentación. En la primera semana, el LDPE registró mayor producción de excreta (0.6995 g) en comparación con el PP

(0.5004 g), lo que sugiere una mayor accesibilidad y procesamiento inicial del polietileno. En la segunda semana, ambos tratamientos evidenciaron una reducción significativa en la excreción (LDPE: 0.2772 g; PP: 0.2983 g), reflejando posibles procesos de adaptación metabólica o disminución en la eficiencia degradativa. Finalmente, en la tercera semana, los valores convergieron (LDPE: 0.1236 g; PP: 0.1194 g), indicando un límite fisiológico común en la capacidad de procesamiento larval hacia la fase final del ciclo. En conjunto, los datos evidencian una mayor degradación inicial del LDPE y una tendencia a la estabilización metabólica en ambos polímeros con el tiempo.

8.4 Área de consumo de polímeros

Los resultados del estudio revelan una dinámica de consumo notablemente diferenciada entre los polímeros LDPE y PP a lo largo del periodo experimental de tres semanas.

Tabla 5

Consumo de polímero de Galleria mellonella en tres semanas de experimentación

Semana	LDPE (cm ²)	PP (cm ²)
1	2680.9	310.7
2	1640.2	246.2
3	717.0	115.1
Total	5038.1	672.0

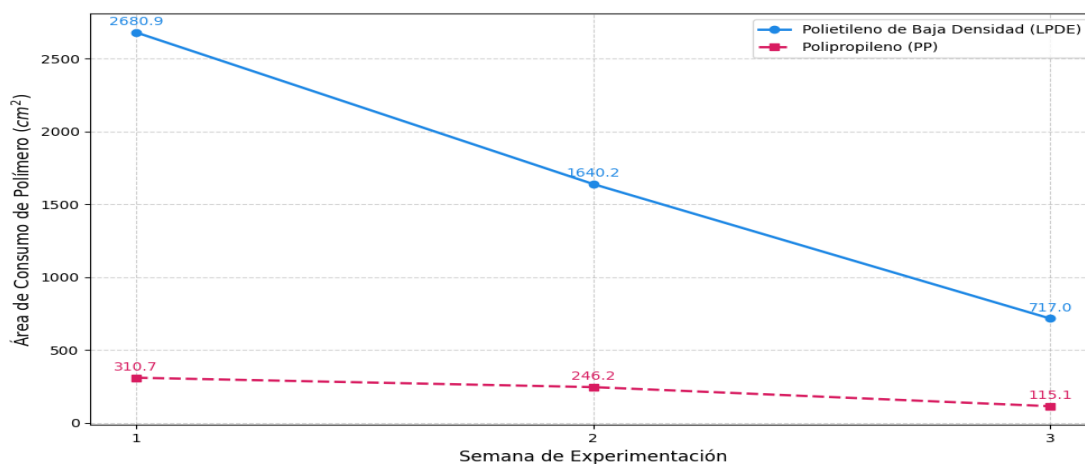
Nota. La tabla presenta el consumo de polímero por *Galleria mellonella* durante tres semanas de experimentación con LDPE y PP. Ante esto, se observa un mayor consumo de LDPE a lo largo del periodo experimental, con una disminución progresiva en la cantidad consumida en ambas condiciones conforme avanzaron las semanas.

Para la primera semana se observó un marcado contraste en el consumo, con las larvas ingiriendo 8.6 veces más área de LDPE (2680.9 cm²) que de PP (310.7 cm²), preferencia inicial que podría atribuirse a la mayor flexibilidad mecánica del LDPE, su menor grado de cristalinidad y su mayor accesibilidad para las enzimas digestivas de las larvas, características que facilitarían su degradación inicial en comparación con la del PP.

Asimismo, durante la segunda semana ambos tratamientos mostraron reducciones significativas en el área consumida: el LDPE presentó un consumo de 1640.2 cm² (38.8 % menos que la primera semana) y el PP alcanzó los 246.2 cm² (20.8 % menos que la semana inicial). Esta disminución simultánea sugiere posibles procesos de adaptación fisiológica en las larvas, como cambios en la eficiencia del consumo o la reducción general en la actividad alimenticia relacionada con su desarrollo. Por otro lado, el patrón de reducción se acentuó notablemente en la tercera semana, con lo que se registraron los valores más bajos de consumo para ambos polímeros, pues el LDPE disminuyó a 717.0 cm² (56.3 % menos que la segunda semana) y el PP a 115.1 cm² (53.2 % menos que el periodo anterior). Este descenso pronunciado podría reflejar el estado prepupa de las larvas, lo que reduce su actividad alimentaria, satura su capacidad de consumo, o invita a cambiar su microbiota intestinal, lo cual afectaría su eficiencia digestiva. Finalmente, la similitud en los porcentajes de reducción para ambos polímeros sugiere que las larvas experimentan procesos metabólicos similares hacia el final de su desarrollo larval; así, estos resultados muestran una clara disminución progresiva del área degradada en ambas semanas.

Figura 4

*Tendencia semanal del área de consumo de polímero por *Galleria mellonella*.*



Nota. La figura muestra la tendencia semanal del área de consumo de LDPE y PP por *Galleria mellonella* durante tres semanas de experimentación. En la primera semana se evidenció un marcado contraste, con un consumo de 2680.9 cm² de LDPE frente a 310.7 cm² de PP, lo que representa una ingesta 8.6 veces mayor del polietileno. En la segunda semana ambos polímeros presentaron una disminución en el área consumida (LDPE: 1640.2 cm²; PP: 246.2 cm²), equivalente a reducciones del 38.8 % y 20.8 %, respectivamente. Finalmente, en la tercera semana se registraron los valores más bajos de consumo (LDPE: 717.0 cm²; PP: 115.1 cm²), con descensos del 56.3 % y 53.2 % respecto a la semana anterior. La reducción progresiva en ambos tratamientos sugiere procesos de adaptación fisiológica y cambios en la actividad alimentaria asociados al desarrollo larval, evidenciando una mayor preferencia y degradación inicial del LDPE en comparación con el PP.

8.5 Análisis por espectroscopía infrarroja (FTIR) del PP

El espectro de infrarrojo es fundamental para identificar la estructura química del polímero y detectar la aparición de nuevos grupos funcionales que son marcadores clave de la oxidación y la biodegradación. A continuación, se presentan los picos significativos observados en su muestra y su interpretación:

8.6 Picos característicos del LDPE y PP

Los siguientes picos confirman la identidad de la muestra como un PP, el cual se compone de largas cadenas de grupos metileno (CH₂) repetitivos. De igual manera, el análisis comparativo de los espectros FTIR de las muestras DP-04725A (PP) y DP-04725B (LDPE) permitió identificar transformaciones químicas asociadas a procesos de degradación, ruptura de cadenas poliméricas y oxidación. Ambos materiales conservaron las bandas características de polímeros saturados, especialmente en la región de 2950-2850 cm⁻¹ (estiramientos C-H alifáticos) y entre 1456-1377 cm⁻¹ (flexiones de grupos CH₂ y CH₃), lo que indica que las

estructuras principales no se destruyeron completamente. Sin embargo, se observaron diferencias notables en el grado de alteración química entre ambos polímeros.

8.7 LDPE: evidencia clara de oxidación y degradación

Para dar sistematizar los resultados del análisis espectroscópico, en la Tabla 5 y en la Figura 4, se muestran las principales bandas identificadas en el espectro, sus números de onda, tipos de vibración y la asignación a grupos funcionales. También se incluye una interpretación asociada a cada señal, permitiendo relacionar las características espectrales con la estructura química del material y posibles procesos de degradación.

Tabla 6

Identificación y asignación de las principales bandas de absorción en el espectro FTIR del polietileno de alta densidad (LDPE).

Número de onda (cm ⁻¹)	Grupo funcional asignado	Interpretación
3273 cm ⁻¹	O–H (hidroxilos)	Indica presencia de humedad o procesos de oxidación del polímero
2918 cm ⁻¹	Alcanos (–CH ₂ –)	Banda característica principal del polietileno
2850 cm ⁻¹	Alcanos (–CH ₂ –)	Confirmación de cadenas alifáticas largas
1641 cm ⁻¹	Carbonilos o insaturaciones	Posible degradación oxidativa del material
1539 cm ⁻¹	Compuestos secundarios	Puede asociarse a impurezas o aditivos
1456 cm ⁻¹	–CH ₂ –	Vibración típica del polietileno
1377 cm ⁻¹	–CH ₃	Indica ramificaciones en la cadena
1236 cm ⁻¹	Esqueleto del polímero	Relacionado con la estructura del PE
1153 cm ⁻¹	Cadena principal	Confirmación estructural del polímero
1018 cm ⁻¹	Región de huella digital	Identificación específica del material

Fuente: Elaboración propia.

A la luz de lo observado en la Figura 4, el análisis del patrón espectral por FTIR, muestra que el material corresponde a LDPE. Se ven bandas intensas a 2918 y 2850 cm⁻¹, que

corresponden al estiramiento asimétrico y simétrico de los grupos metileno ($-\text{CH}_2-$), y una señal a 1456 cm^{-1} , que corresponde a la deformación de estos grupos. También, la banda observada en 1377 cm^{-1} , correspondiente a grupos metilo ($-\text{CH}_3$), sugiere un alto grado de ramificación en la cadena polimérica, característica distintiva del LDPE en comparación con otros tipos de polietileno. Por otro lado, los picos de la región de huella dactilar (1236 , 1153 y 1018 cm^{-1}) apoyan la identificación del esqueleto alifático del polímero, acorde a lo reportado en la literatura reciente (Andrady, 2020; Silva et al., 2021).

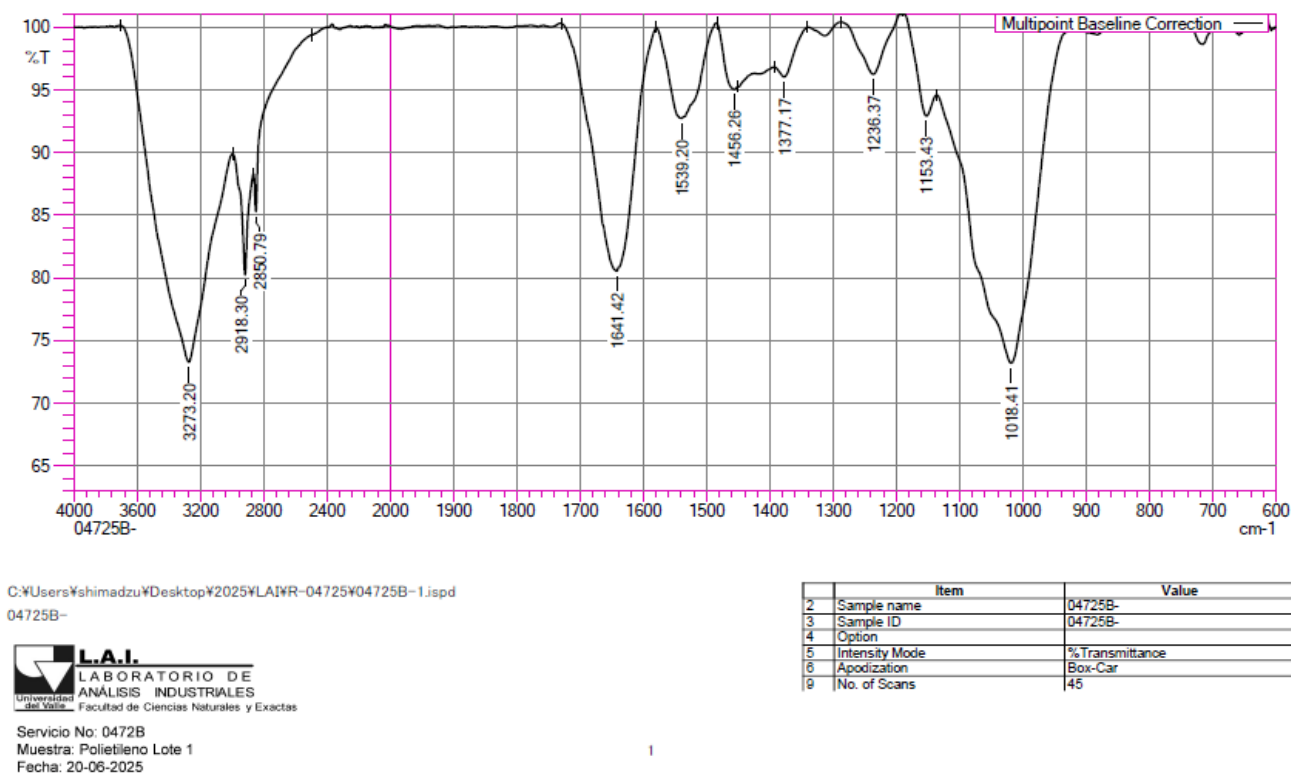
Por otra parte, las bandas en 3273 cm^{-1} ($\text{O}-\text{H}$) y 1641 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}/\text{C}=\text{C}$) sugieren que el material ha sufrido procesos de degradación oxidativa. Esto está de acuerdo con lo que se conoce del LDPE, que tiende a ser más susceptible a la foto-oxidación debido a su menor cristalinidad y a un mayor grado de ramificación, lo cual facilita la entrada de oxígeno y la generación de radicales libres (Gewert et al., 2015; Zhang et al., 2021). De esta forma se forman hidroperóxidos que luego se rompen en compuestos oxigenados como las cetonas, los aldehídos y los ácidos carboxílicos, lo que se ve reflejado en la aparición de grupos carbonilo e hidroxilo en el espectro. La señal cerca de 1641 cm^{-1} también puede ser asociada con la formación de dobles enlaces, que es un resultado de la ruptura de las cadenas poliméricas (Al-Salem et al., 2019).

También, la banda en 1539 cm^{-1} podría estar indicando la presencia de compuestos secundarios, ya sea por procesos de degradación o por aditivos incorporados originalmente, como estabilizantes o compuestos nitrogenados. En los materiales de LDPE post-consumo, este tipo de señales se relacionan con frecuencia con la transformación de aditivos durante el envejecimiento ambiental o con la acumulación de contaminantes externos (Hahladakis & Iacovidou, 2019; Singh & Sharma, 2022). Este comportamiento coincide con materiales que han estado expuestos durante largos períodos a factores como la radiación UV, el oxígeno y los cambios de temperatura que aceleran su deterioro.

Desde el punto de vista de la valorización, el nivel de oxidación observado tiene importantes repercusiones en su aprovechamiento. Por otro lado, los grupos oxigenados pueden reducir el poder calorífico y afectar la calidad del gas de síntesis en procesos como la gasificación, lo que tiene un impacto negativo en la eficiencia de rutas como la síntesis Fischer-Tropsch (Lopez et al., 2020; Shen et al., 2020). Por otro lado, esta degradación también puede hacer que el material sea más reactivo térmicamente al disminuir la estabilidad de las cadenas, lo cual podría traducirse en menores requerimientos energéticos durante el proceso. El LDPE analizado puede considerarse en conjunto como un residuo parcialmente degradado: tiene limitaciones para el reciclado mecánico, pero aún conserva potencial para ser aprovechado mediante procesos termoquímicos.

Figura 5

Estabilidad química del LDPE frente a la exposición biológica.



Nota. En el espectro FTIR del LDPE expuesto a *Galleria mellonella* se observan evidencias de degradación oxidativa, evidenciadas por la presencia de una banda ancha en 3273 cm^{-1} (O-H)

y el incremento de la señal en torno a 1641 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ o $\text{C}=\text{C}$). Las variaciones observadas en la zona $2918\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ y en el intervalo $1470\text{--}720\text{ cm}^{-1}$ indican modificaciones estructurales del material, evidenciando una degradación estructural de la cadena polimérica (biodegradación). De igual manera, los cambios en la zona $1153\text{--}1081\text{ cm}^{-1}$ concuerdan con la formación de enlaces $\text{C}-\text{O}$ relacionados con procesos de oxidación secundaria.

8.8 Análisis por espectroscopía infrarroja (FTIR) del PP

El PP es una poliolefina semicristalina formada por unidades repetitivas de propileno, y su característica estructural más importante es que los grupos metilo ($-\text{CH}_3$) están presentes como sustituyentes laterales en la cadena principal. Esta característica afecta tanto a sus propiedades físicas como a su comportamiento espectroscópico, en particular, en técnicas como la espectroscopía infrarroja, donde las vibraciones de los enlaces $\text{C}-\text{H}$ en grupos metilo y metileno son las que permiten su identificación (Tabla 7).

Tabla 7

Identificación y asignación de las principales bandas de absorción en el espectro FTIR del polipropileno (PP).

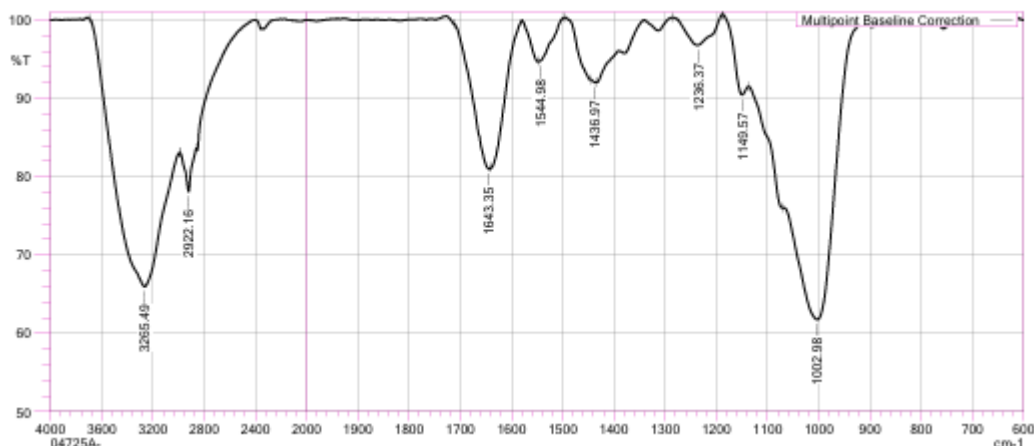
Número de onda (cm^{-1})	Componente o grupo funcional	Interpretación
3265.46	$\text{O}-\text{H}$ (hidroxilo)	Presencia de humedad o posible contaminación superficial (no típico del PP puro)
2922.16	$\text{C}-\text{H}$ (CH_2 / CH_3)	Indica cadenas hidrocarbonadas propias del polipropileno
1643.35	$\text{C}=\text{C}$ o $\text{H}-\text{O}-\text{H}$	Puede indicar agua adsorbida o ligeras insaturaciones
1544.98	$\text{C}-\text{H}$ / posible aditivo	Posible presencia de aditivos o impurezas en la muestra
1436.97	CH_2 / CH_3	Banda característica de la estructura del polipropileno
1236.37	$\text{C}-\text{H}$ (CH_3)	Asociada a la estructura isotáctica del PP
1149.57	$\text{C}-\text{C}$	Corresponde al esqueleto de la cadena polimérica
1002.98	CH_3	Vibración típica de grupos metilo del polipropileno

Fuente: Elaboración propia.

En el espectro obtenido (Figura 5) se aprecian las bandas características propias de las vibraciones de los enlaces C–H de cadenas alifáticas, típicas de los polímeros poliolefinicos. Entre 2920 y 2850 cm^{-1} se aprecian intensas bandas asignables a los estiramientos asimétricos y simétricos de los grupos metileno ($-\text{CH}_2-$) de la cadena principal del polímero. Estas absorciones son una de las señales más características del polietileno.

Figura 6

Estabilidad química del PP frente a la exposición biológica.



Nota. El espectro FTIR del polipropileno (PP) muestra bandas características de cadenas alifáticas en 2922 cm^{-1} (C–H) y señales en 1453 y 1377 cm^{-1} asociadas a grupos $-\text{CH}_2-$ y $-\text{CH}_3$, esta última distintiva del PP. La banda ancha en $\sim 3365 \text{ cm}^{-1}$ (O–H) y la señal débil en 1643 cm^{-1} sugieren una oxidación superficial incipiente. En la región de huella digital (1235–1003 cm^{-1}) se observan vibraciones del esqueleto polimérico. En conjunto, el material conserva su estructura con evidencia de degradación.

En el rango cercano a 1470–1460 cm^{-1} se aprecia además una banda asociada a vibraciones de flexión (scissoring) del grupo $-\text{CH}_2-$, y en la zona aproximada a 1370 cm^{-1} se identifican señales relacionadas con deformaciones del grupo metilo ($-\text{CH}_3$). En la región 730–720 cm^{-1} se nota una banda característica que se atribuye a vibraciones de balanceo (rocking)

de los grupos metileno en cadenas largas, considerada un indicador típico de la estructura cristalina del polietileno.

En líneas generales el espectro exhibe un perfil característico de materiales poliolefínicos saturados sin evidencias importantes de bandas asociadas a grupos funcionales oxigenados (ej. carbonilos o hidroxilos) en las regiones correspondientes. Esto indica que la muestra analizada tiene una composición química predominante de hidrocarburos saturados, en acuerdo con la composición esperada para el polietileno de baja densidad (LDPE).

9 Discusión

9.1 Condiciones óptimas de reproducción *Galleria mellonella*

Los hallazgos del estudio de mortalidad acumulativa indican que el polímero ejerce una influencia significativa en la supervivencia de las larvas. En los estudios realizados con polipropileno (PP), la mortalidad acumulada fue significativamente superior a la de LDPE; esto indica que las características fisicoquímicas de cada polímero pueden tener un impacto en la adaptación de las larvas y en el proceso digestivo del material.

Las investigaciones precedentes señalan que las larvas de *Galleria mellonella* tienen la capacidad de fraccionar, incluso acelerar la degradación de polímeros específicos, particularmente el PP, debido a una combinación de enzimas digestivas y microorganismos intestinales (Lou et al., 2020). En consecuencia, la reducida mortalidad observada en el tratamiento con LDPE podría atribuirse a su mayor compatibilidad con el sistema digestivo de las larvas, lo que facilitaría su utilización biológica.

Además, los materiales de mayor rigidez o con una estructura molecular inaccesible suelen presentar dificultades significativas para los organismos que participan en el proceso de biodegradación. En este contexto, Réjasse et al. (2021) constataron que, aunque es viable la interacción de *Galleria mellonella* con diversos tipos de plásticos, la eficacia de esta dependerá considerablemente de las propiedades físicas y químicas del polímero, así como de la habilidad metabólica de las larvas para manejar los compuestos producidos durante el proceso de descomposición.

Estos hallazgos se alinean con la investigación realizada por Ruiz et al. (2022), quienes identificaron una mayor mortalidad en las larvas expuestas a PP en comparación con LDPE. Bombelli et al. (2017) también evidenciaron que las enzimas presentes en la saliva de *Galleria* desempeñaban este papel.

En última instancia, los hallazgos obtenidos y la evidencia académica corroboran que la bioasimilación se rige por la estructura molecular del polímero, lo que fortalece la hipótesis de que el LDPE es más accesible y menos tóxico para las larvas. Además, los resultados evidencian una relación de tolerancia más pronunciada con el sistema digestivo de las larvas, lo que podría simplificar los procesos de adaptación y minimizar la acumulación de efectos adversos.

Esta conducta indica que la aptitud de las larvas para biodegradar plásticos no se atribuye exclusivamente a la presencia de enzimas o a la microbiota intestinal. Además, la compatibilidad entre la estructura molecular del polímero y los procesos metabólicos del organismo desempeña un papel crucial. Los hallazgos respaldan la premisa de que la biodegradación biológica de los plásticos debería ser examinada considerando la naturaleza química intrínseca del material. Esto, por otro lado, posibilita la realización de investigaciones comparativas más extensas que faciliten una comprensión más profunda de la selectividad y eficacia de diversos insectos en el procesamiento de residuos plásticos.

9.2 Biodegradación de polímeros de *Galleria mellonella* y variación en el peso de la excreta con dieta de polímeros

El presente trabajo muestra que las larvas de *Galleria mellonella* son capaces de degradar algunos polímeros sintéticos como el LDPE y el PP, lo que fue evidente por la producción de excretas durante el periodo experimental. En la fase inicial del experimento se observó que las larvas alimentadas con LDPE producían mayor cantidad de excretas que las alimentadas con PP, lo que sugiere que el primero sería un material más accesible metabólicamente.

Una explicación posible de esta diferencia está en las características estructurales de los dos polímeros. El LDPE es más ramificado y tiene menos cristalinidad que el polipropileno. Estas características propician la formación de regiones amorfas en el material, que son más

sensibles a procesos de oxidación y a la rotura inicial de las cadenas poliméricas (Gewert et al., 2015). Por lo tanto, durante las etapas tempranas de exposición, las larvas podrían procesar el LDPE con más facilidad.

Así, la mayor producción de excretas observada en el tratamiento con LDPE durante la primera semana podría corresponder a una mayor tasa inicial de procesamiento del material. Por otra parte, la reducción progresiva de la producción de excretas observada durante las tres semanas de experimentación podría estar relacionada con ciertas limitaciones fisiológicas y metabólicas propias del desarrollo larval.

Se ha reportado que en *Galleria mellonella* la descomposición de polímeros depende tanto de la actividad enzimática del insecto como de la acción de la microbiota presente en su intestino, la cual podría estar involucrada en la transformación de compuestos poliméricos complejos (Kong et al., 2019). En este sentido la disminución observada entre la primera y la segunda semana podría corresponder a un proceso de adaptación metabólica del sustrato o a una disminución de la eficiencia degradativa. Esto también puede verse afectado por la baja disponibilidad energética de los plásticos, ya que estos materiales no constituyen una adecuada fuente nutricional para las larvas.

También se han localizado, en estudios recientes, enzimas en la saliva de la *Galleria mellonella* que pueden iniciar la oxidación de las cadenas de polietileno. Ese proceso representa una etapa clave en los mecanismos de biodegradación de los plásticos, ya que estas enzimas, que pertenecen a la familia de las fenoloxidasas, rompen los enlaces carbono-carbono del polímero generando compuestos intermedios que son metabolizados posteriormente por el sistema digestivo del insecto o por microorganismos asociados (Bombelli et al., 2022). Este mecanismo podría explicar tanto la mayor degradación inicial observada en el LDPE como la posterior estabilización de los niveles de excreción.

Finalmente, la tendencia a valores similares de excreción durante la tercera semana podría indicar que existe un límite fisiológico en la capacidad degradativa de las larvas. Es

normal que, al avanzar su ciclo de desarrollo, disminuyan su tasa de alimentación e inicien procesos metabólicos relacionados a la preparación para la metamorfosis. En esta transición la actividad digestiva puede bajar y por lo tanto la producción de excretas. Este patrón ya había sido descrito en otros estudios experimentales sobre la biodegradación de plásticos por insectos, donde se ha observado que las tasas de consumo tienden a decrecer con el tiempo de exposición al sustrato polimérico (Yang et al., 2015).

9.3 Área de consumo de polímeros

Los resultados obtenidos en relación con el área de consumo de polímeros muestran una marcada preferencia de las larvas de *Galleria mellonella* por el LDPE frente al PP durante el periodo experimental.

La diferencia total registrada entre ambos polímeros es muy significativa, 5038,1 cm² para el LDPE y 672,0 cm² para el PP, lo que indica que las larvas degradaron alrededor de 7,5 veces más superficie de LDPE que de PP durante las tres semanas del experimento. Esa tendencia sugiere que las propiedades físico químicas de los polímeros inciden de manera importante sobre la susceptibilidad de éstos a la degradación biológica.

La mayor degradación inicial del LDPE observada en la primera semana concuerda con las características estructurales de este polímero. El LDPE tiene una estructura más ramificada y un menor grado de cristalinidad que el PP, lo cual genera regiones amorfas más accesibles a la acción enzimática y facilita la fragmentación del material (Gewert et al., 2015). El PP, por el contrario, tiene una mayor rigidez estructural y un mayor grado de cristalinidad, lo que dificulta la penetración de enzimas y microorganismos responsables de los procesos de degradación. Este comportamiento está ampliamente documentado en estudios sobre degradación de poliolefinas, donde los polímeros con menor cristalinidad tienden a ser más susceptibles a procesos de oxidación y biodegradación.

El alto consumo inicial de LDPE observado en este estudio coincide también con investigaciones que han demostrado que *Galleria mellonella* puede degradar polietileno a través de mecanismos bioquímicos específicos. Las larvas de esta especie son capaces de oxidar y fragmentar el polietileno a través de enzimas presentes en su saliva, generando compuestos de menor peso molecular que pueden ser posteriormente metabolizados, tal y como se ha demostrado recientemente por Bertocchini et al. (2017). Este proceso justifica por qué el polietileno se puede procesar más rápido que otros polímeros más estructuralmente resistentes.

Además, la reducción gradual en el área consumida a lo largo de las tres semanas sugiere cambios fisiológicos asociados al desarrollo larval. La disminución del consumo entre la primera y la segunda semana y el descenso más pronunciado que se observa en la tercera semana podrían estar relacionados con la transición de las larvas al estado de prepupa, etapa en la que la actividad alimentaria se reduce significativamente. Este comportamiento ha sido reportado en estudios entomológicos donde se ha observado que las larvas de *Galleria mellonella* disminuyen su ingesta de alimento a medida que se aproximan al proceso de metamorfosis (Kwadha et al., 2017).

Otro factor que puede influir en la reducción progresiva de la ingesta es la adaptación metabólica al sustrato polimérico. Los plásticos no son una fuente nutricional natural para estas larvas, por lo que su consumo prolongado puede producir limitaciones energéticas y disminuir la eficiencia digestiva a largo plazo. Estudios recientes demuestran que la biodegradación del polietileno por parte de la polilla de cera *Galleria mellonella*, no sólo depende de las enzimas del insecto sino también de la microbiota de su intestino, la cual está implicada en la transformación de complejos compuestos poliméricos (Kong et al., 2019). Los cambios en la composición de esta microbiota a lo largo del desarrollo larvario podrían afectar a la capacidad de degradación observada en las etapas finales del experimento.

El hecho de que los porcentajes de reducción de consumo de ambos polímeros sean similares durante la tercera semana, también apunta a que existen limitaciones fisiológicas comunes en el proceso de biodegradación. Aunque los polímeros difieran inicialmente en su degradabilidad, las larvas parecen converger a un procesamiento máximo determinado por su estado metabólico y la energía disponible a partir de los sustratos consumidos. Este comportamiento también se ha observado en otros estudios sobre degradación de plásticos por insectos, en los que las tasas de consumo disminuyen progresivamente con el tiempo de exposición al polímero (Yang et al., 2015).

Los resultados obtenidos en conjunto evidencian que *Galleria mellonella* presenta mayor capacidad inicial para degradar LDPE que PP, lo cual está asociado a las propiedades estructurales de los polímeros y los mecanismos bioquímicos implicados en su procesamiento. No obstante, la reducción gradual del consumo apunta a restricciones fisiológicas y metabólicas que limitan la eficiencia de la degradación a largo plazo. Estos resultados están de acuerdo con la literatura científica más reciente y ratifican el potencial de *Galleria mellonella* como organismo modelo en el estudio de procesos biológicos aplicados a la degradación de residuos plásticos.

9.4 Análisis por espectroscopía infrarroja

El estudio comparativo de los espectros FTIR de PP y LDPE permite no sólo identificar la presencia de los grupos funcionales característicos de las poliolefinas, sino también algunas diferencias asociadas a la estructura molecular y grado de organización de sus cadenas poliméricas. En particular, la intensidad relativa y la definición de ciertas bandas espectrales pueden relacionarse con el nivel de cristalinidad y el grado de ramificación del material, lo cual afecta directamente sus propiedades físicas y químicas (Silverstein et al., 2014).

La estructura muy ramificada del LDPE hace que las cadenas poliméricas se empaqueten peor, por lo que el grado de cristalinidad es menor que en otros tipos de

polietileno. Estos cambios se observan en la forma y en el ancho de algunas bandas del espectro infrarrojo, especialmente en aquellas bandas que están asociadas con las vibraciones de los grupos metileno (Silverstein et al., 2014). Varios estudios han mostrado que los cambios en la intensidad relativa de estas bandas pueden estar relacionados con la distribución conformacional de las cadenas y con la proporción de regiones amorfas y cristalinas en el polímero.

Por otra parte, el análisis espectral permite, además, identificar regiones del espectro especialmente sensibles a los cambios estructurales del material. En estudios de degradación de poliolefinas se ha observado que en ciertos rangos del espectro FTIR, en especial aquellos que corresponden a grupos metileno y metilo, pueden producirse cambios en su intensidad o definición cuando el polímero se somete a procesos de transformación física, química o biológica. El espectro obtenido en el presente estudio puede ser entendido, en este contexto, como un patrón de referencia de la estructura del material antes de que ocurran posibles modificaciones en su composición química.

Del mismo modo, la caracterización mediante FTIR es útil para conocer el comportamiento del polímero frente a los diversos procesos de degradación ambiental o biológica. Esta estructura del PP y del LDPE, formada mayoritariamente por hidrocarburos y carente de grupos funcionales muy reactivos, explica en buena medida su gran resistencia a la degradación natural. Pero las diferencias estructurales entre ambos polímeros -sobre todo, el mayor grado de ramificación presente en el LDPE pueden dar lugar a zonas con una mayor accesibilidad molecular. Esto podría facilitar la interacción con agentes externos y, por lo tanto, incidir sobre su susceptibilidad frente a determinados procesos de degradación.

Desde un punto de vista estructural más detallado, el polipropileno (PP) exhibe en su espectro FTIR una respuesta característica a su configuración estereoquímica (tacticidad) y, de esta manera, permite diferenciar entre las zonas más ordenadas y las regiones amorfas del material. En la industria, la forma isotáctica es la predominante y se asocia con una mayor

cristalinidad que da lugar a bandas más definidas en la región de la huella dactilar (1000–1300 cm^{-1}). Las variaciones en esta zona del espectro se han demostrado que están asociadas con cambios en la organización molecular del polímero y propiedades térmicas tales como la temperatura de fusión y la rigidez (Coates, 2006; Márquez, 2019).

El PP también es especialmente susceptible de procesos de oxidación térmica y foto-oxidación. Esto se debe a que en la cadena principal existen carbonos terciarios que facilitan la formación de radicales libres. Numerosos estudios han demostrado que durante la degradación se forman hidroperóxidos que posteriormente se descomponen en compuestos oxigenados como son las cetonas, los aldehídos y los ácidos carboxílicos que se pueden identificar mediante FTIR (Khelidj et al., 2019; Zhang et al., 2021). A este respecto se considera que la aparición de bandas asociadas a grupos carbonilo e hidroxilo es un indicador bastante claro del grado de envejecimiento del material.

Por otra parte, mediante el análisis espectral se pueden conocer procesos de escisión de cadena y la consiguiente disminución del peso molecular que influyen directamente sobre las propiedades reológicas y mecánicas del PP. A diferencia de otras poliolefinas, tales como el LDPE, en donde la ramificación desempeña un rol más importante, en el PP la degradación se manifiesta mayoritariamente como una disminución en la longitud de las cadenas. Esto afecta tanto su viscosidad como su comportamiento durante el procesamiento.

Por último, en cuanto a valorización, la actuación del PP en procesos termoquímicos tales como pirólisis y gasificación está íntimamente relacionada con su estructura molecular. Varios estudios sobre la conversión de residuos plásticos han reportado que la presencia de grupos metilo laterales favorece la formación de hidrocarburos ligeros y olefinas. Esto puede ser una ventaja en la producción de combustibles o materias primas petroquímicas, pero también plantea retos en cuanto al control de la selectividad del proceso (Lopez et al., 2020; Sharuddin et al., 2018). En este contexto, el FTIR no sólo sirve para caracterizar el material sino también para prever su posible comportamiento en las distintas rutas de aprovechamiento.

9.5 Diferenciación espectral y susceptibilidad oxidativa en poliolefinas: contraste entre LDPE y PP

El análisis comparativo de los espectros FTIR pone de manifiesto diferencias estructurales entre el LDPE y el PP, que se reflejan en la naturaleza e intensidad de sus bandas características. En el LDPE predominan las vibraciones asociadas a grupos metileno (CH_2), con señales intensas en 2918 , 2850 y 1456 cm^{-1} , y una banda en 1377 cm^{-1} que indica la presencia de ramificaciones. Por otro lado, se puede observar que el PP está compuesto por un mayor número de grupos metilo (CH_3), como lo demuestran las bandas a 1377 y 1002 cm^{-1} , así como las señales en la zona de 1236 – 1000 cm^{-1} que corresponden a las deformaciones típicas de estos grupos. Estas diferencias, que hacen posible su diferenciación inequívoca mediante espectroscopía infrarroja (Villanueva y Morales, 2023), se deben a la estructura química de ambas poliolefinas.

En los procesos de degradación, el LDPE presenta evidencia clara de oxidación, observada en el surgimiento de bandas en $\sim 3273\text{ cm}^{-1}$ (O-H) y $\sim 1641\text{ cm}^{-1}$ (C=O/C=C), lo que sugiere la formación de grupos oxigenados a partir de mecanismos fotooxidativos. Este comportamiento se relaciona con la formación de hidroperóxidos y su posterior descomposición en compuestos como las cetonas y los aldehídos, lo que va seguido de escisión de cadenas. Por el contrario, en estas regiones el PP muestra únicamente señales débiles (~ 3265 y $\sim 1643\text{ cm}^{-1}$), sin una banda definida de carbonilos, lo que sugiere una oxidación limitada y, sobre todo, superficial. Esta diferencia está relacionada con la mayor susceptibilidad del LDPE a la difusión de oxígeno y a la acción de agentes degradantes (Vargas y Zapata, 2025).

Por último, el análisis de la zona de la huella digital refuerza la diferenciación entre ambos materiales. Las bandas en 1236 , 1153 y 1018 cm^{-1} en el LDPE se deben principalmente a vibraciones del esqueleto C-C , mientras que en el PP estas mismas regiones reciben contribuciones importantes de grupos metilo, lo que indica una complejidad vibracional mayor.

Además, la presencia de señales alrededor de $1539\text{--}1544\text{ cm}^{-1}$ en ambos materiales puede estar relacionada con la presencia de aditivos o productos secundarios de degradación, pero su impacto es mayor en el LDPE por su mayor grado de oxidación. Los resultados, en conjunto, indican que el LDPE se encuentra en un estado de degradación más avanzado, mientras que el PP mantiene en mayor medida su integridad estructural, lo que influye directamente en su comportamiento frente a procesos de valorización (Arráez et al., 2017).

10 Conclusiones

Los resultados de esta investigación demuestran que la *Galleria mellonella* presenta una capacidad diferenciada para la biodegradación de LDPE y PP, donde el primero es el polímero con mayor susceptibilidad a degradarse por las larvas, mientras que el PP muestra una resistencia considerable tanto a nivel físico como químico. De ese modo, los análisis fisiológicos, mediciones de consumo y resultados espectroscópicos permiten concluir que el LDPE experimentó un proceso real de degradación química inducida por la interacción biológica con las larvas, mientras que en el PP únicamente se evidenciaron transformaciones superficiales que no representan una biodegradación significativa.

En primer lugar, las larvas mostraron una mayor supervivencia y adaptabilidad al LDPE, por lo que registraron una mortalidad total de solo 19 individuos frente a los 50 observados en el PP. Esta diferencia refleja que el LDPE es estructuralmente más compatible con el sistema digestivo larval, posiblemente por su menor cristalinidad y mayor flexibilidad, lo que facilita su manipulación y fragmentación. El PP, por el contrario, generó mayor estrés fisiológico debido a su rigidez estructural y baja accesibilidad química, lo cual se manifestó en una mortalidad temprana y sostenida.

El análisis del consumo y la excreción reafirmaron esta tendencia. El área consumida del LDPE fue más de ocho veces superior a la del PP durante la primera semana, y se mantuvo así en todo el experimento. Con respecto a la producción acumulada de excretas, esta también fue mayor en el LDPE (1.1003 gr) respecto al PP (0.9181 gr), lo que indica que las larvas procesaron más activamente el LDPE a nivel digestivo. Así, aunque ambas mediciones disminuyeron progresivamente hacia la tercera semana, esta reducción responde a cambios propios del desarrollo larval –particularmente el tránsito hacia la fase prepupal– más que a las características del polímero.

De otra parte, el análisis por FTIR constituyó la evidencia más sólida del proceso de biodegradación. En el caso del LDPE, el espectro reveló transformaciones químicas profundas, con lo que se destacó lo siguiente: a) la aparición de una banda intensa entre $1715\text{-}1730\text{ cm}^{-1}$, correspondiente a grupos carbonilo (C=O), inexistentes en el polímero virgen y asociados a procesos de oxidación; b) una banda ancha en 3430 cm^{-1} , indicativa de grupos hidroxilo (O-H), producto de la formación de alcoholes, hidroperóxidos o humedad retenida tras la degradación; c) una disminución significativa de las bandas $2918\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$ y $1470\text{-}720\text{ cm}^{-1}$, lo que evidencia una ruptura de cadenas C-C y C-H y pérdida de cristalinidad; y d) un incremento en la región $1160\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$, asociado a la formación de enlaces C-O propios de procesos oxidativos avanzados.

Estas modificaciones confirman un proceso de biodegradación activa del LDPE, caracterizado por ruptura de cadenas, generación de radicales libres y formación de nuevos grupos oxigenados que aumentan la polaridad del material, lo que lo vuelve más susceptible al ataque biológico. En contraste, el PP solo presentó cambios superficiales:

- a. Ligera disminución en las bandas C-H ($2950\text{-}2840\text{ cm}^{-1}$).
- b. Reducciones mínimas en las deformaciones CH_2/CH_3 ($1460\text{-}1375\text{ cm}^{-1}$).
- c. Aparición débil y poco representativa de un grupo carbonilo.
- d. Ausencia de banda O-H en 3430 cm^{-1} .
- e. Incremento leve en la región $1160\text{-}975\text{ cm}^{-1}$ sin cambios estructurales profundos.

Estos resultados confirman que el PP mantuvo su estabilidad química y que las larvas generaron principalmente daño físico (raspado, perforación) sin una biodegradación molecular significativa. Además, su estructura con grupos metilo laterales dificulta la abstracción de hidrógeno y limita la propagación de radicales libres, con lo que se reduce su vulnerabilidad a procesos oxidativos.

En conjunto, la evidencia experimental demuestra que la *Galleria mellonella* es un agente biotecnológico promisorio para la degradación del LDPE, por lo que se logran modificaciones químicas claras y medibles a nivel molecular, mientras que su efecto sobre el PP es limitado y no representa un mecanismo viable de biodegradación.

Finalmente, esta investigación aporta conocimiento relevante para el desarrollo de estrategias de biorremediación basadas en insectos, y sugiere que estudios futuros profundicen en el papel de las enzimas digestivas, el microbiota intestinal y la optimización de variables ambientales que potencien el proceso degradativo en polímeros de difícil manejo ambiental.

11 Referencias

- Andrady, A., & Neal, M. (2009). Aplicaciones y beneficios sociales de los plásticos. *Transacciones Filosóficas B*, 364(152), 10.1098/rstb.2008.0304.
- Bombelli, P., Howe, C. J., & Bertocchini, F. (2017). Polyethylene bio-degradation by caterpillars of the wax moth *Galleria mellonella*. *Current Biology*, 27(8), R292–R293.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.02.060>.
- Chandra, R., & Rustgi, R. (1998). Polímeros biodegradables. *Prog. Polym. Sci.*, 23, 1273–1335.
- Ellis, J. D., Graham, J. R., & Mortensen, A. (2013). Standard methods for wax moth 28 research. *Journal of Apicultural Research*, 52(1), 1–17.
<https://doi.org/10.3896/ibra.1.52.1.10>.
- Eskander, S., & Saleh, H. E. (2017). Biodegradation : Process Mechanism. *Biodegradation and Bioremediation*, 8(January), 1–31.
https://www.researchgate.net/publication/312491332_Biodegradation_Process_Mechanism.
- Geyer, R., Jambeck, J., & Lavender, K. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- Jiménez, C. (2019). *Biodegradación del poliestireno expandido por larvas* .
<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/37360>
- Jorjão, A., Oliveira, L., Scorzoni, L., Figueiredo-Godoi, L., Prata, C., & Junqueira, J. (2018). De las polillas a las orugas: condiciones ideales para la cría de *Galleria mellonella* para estudios microbiológicos in vivo. *Virulencia*, 9 (1), 383-389.
- Kwadha, C. A., Ong'Amo, G. O., Ndegwa, P. N., Raina, S. K., & Fombong, A. T. (2017). The biology and control of the greater wax moth, *Galleria mellonella*. *Insects*, 8(2), 1– 18.
<https://doi.org/10.3390/insects8020061>.

- Lindberg, A. A.-C., Barenstedt, C., Karlsson, S., & Lindberg, T. (1995). Degradation morphology differentiate degradable product pattern and changes as means to abiotically and biotically polyethylene. *Science*, 36(16), 3075–3083.
- Lwanga, E., Thapa, B., Yang, X., Gertsen, H., Salánki, T., Geissen, V., & Garbeva, P. (2018). Decay of low-density polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: A potential for soil restoration. *Science of the Total Environment*, 624, 753–757. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.144>.
- Márquez, A. (2019). *Viabilidad de la biodegradación de Polietileno y Poliuretano por la polilla de la cera (Galleria mellonella): Factores que afectan tasas de degradación y supervivencia*. [Pontificia Universidad Javeriana]. <https://apidspace.javeriana.edu.co/server/api/core/bitstreams/a65ebcf2-2cac-4968-8d18-0a284009454a/content>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Plan nacional para la gestión sostenible de los plásticos de un solo uso*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/plan-nacional-para-la-gestion-sostenible-de-plasticos-un-solo-uso-minambiente.pdf>
- Paddock, F. B. (1918). *The Beemoth or Waxworm*. Texas Agricultural Experiment Station.
- Realpe-Aranda, J. F., Bustillo-Pardey, A. E., & López-Núñez, J. C. (2007). Optimización de la cría de *Galleria mellonella* (L.) para la producción de nematodos entomopatógenos parásitos de la broca del café. *Cenicafé*, 58(2), 142–157.
- Restrepo-García, A., Arias-Ortega, P., & y Soto-Giraldo, L. (2019). Effects of different sources of honey in the breed of *Galleria mellonella* (Lepidoptera: pyralidae) for the multiplication of entomopathogenic nematodes. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 23(1). <https://doi.org/10.17151/bccm.2019.23.1.4> .
- Salas, M. A. (2015). *Efectos de dietas artificiales en la crianza de Galleria mellonella L. (Lepidoptera: Pyralidae)*. <https://bit.ly/3q36Lmv>

- Shah, A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Degradación biológica de los plásticos: una revisión exhaustiva. *Avances en Biotecnología*, 26(3).
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>.
- Singh, B., & Sharma, N. (2008). Mechanistic implications of plastic degradation. *Polymer Degradation and Stability*, 93(3), 561–584.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008>.
- Sivan, A. (2011). New perspectives in plastic biodegradation. *Current Opinion in Biotechnology*, 22(3), 422–426. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.01.013>.
- Smith, T. L. (2014). External Morphology of the Larva, Pupa, and Adult of the Wax Moth, *Galleria mellonella*. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 38(3), 287–310
- Son, J. S., Lee, S., Hwang, S., Jeong, J., Jang, S., Gong, J., ... & Ryu, C. M. (2024). Enzymatic oxidation of polyethylene by *Galleria mellonella* intestinal cytochrome P450s. *Journal of hazardous materials*, 480, 136264. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136264>
- Vargas, A. F., & Zapata, N. (2025). Estudio del pretratamiento de polipropileno y polietilentereftalato con UV y metanol empleando FTIR y quimiometría. Ingenierías USBMed.
https://nuevo.metarevistas.org/Record/metarevistapublica_unisanbuenaventura_ingenieriasusbmed_57-article-6531
- Villanueva, J., & Morales, A. (2023). Uso de tecnología IR para caracterización de mezclas de polipropileno y polietileno de alta densidad para materiales posconsumo. *Teknos Revista Científica*. <https://www.revistas-tecnologicocomfenalco.info/index.php/teknos/article/view/1065>
- Yang, Y., Yang, J., Wu, W. M., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., ... & Jiang, L. (2015). Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: Part 1. Chemical and physical characterization and isotopic tests. *Environmental science & technology*, 49(20), 12080-12086. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02661>

Zhang, K., Hamidian, A. H., Tubić, A., Zhang, Y., Fang, J. K. H., Wu, C., & Lam, P. K. S. (2021). Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment. *Environmental Pollution*, 274, 116554. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554>

12 Anexos

Figura A1	Figura A2
	
Recolecta de larva <i>Galleria mellonella</i>	Reproducción de crisálidas
Figura A3	Figura A4
	
separación de larvas de <i>Galleria mellonella</i> de la cera de abeja	Macho de <i>Galleria mellonella</i>

Figura A5



Dieta artificial de *Galleria mellonella*

Figura A6

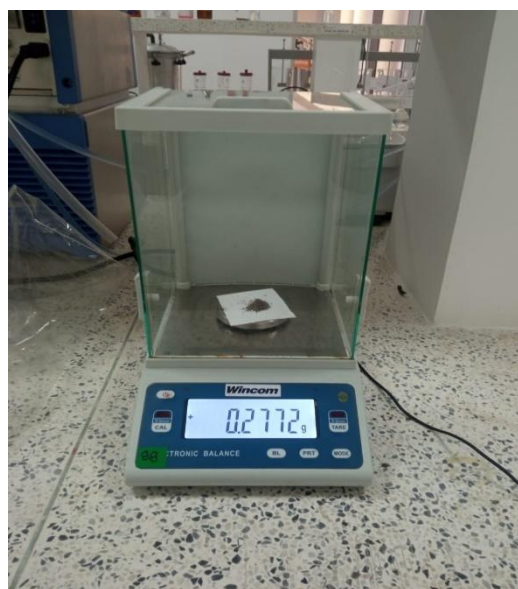


Separación de individuos de *Galleria mellonella* para experimentación con polímeros

Figura A7



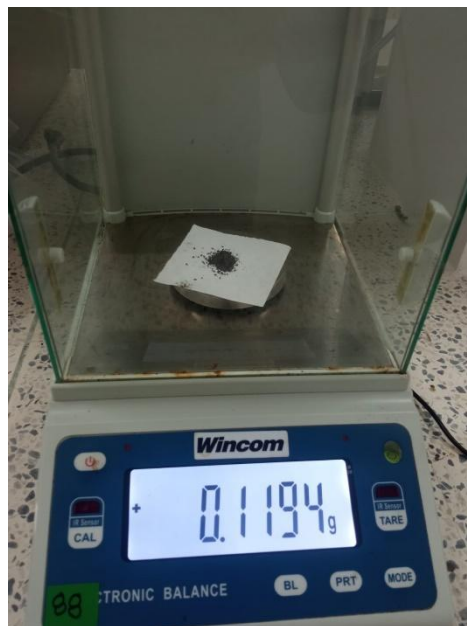
Figura A7



Excreta de <i>Galleria mellonella</i> LDPE semana 1	Excreta de <i>Galleria mellonella</i> LDPE semana 2
Figura	Figura A1
	
Excreta de <i>Galleria mellonella</i> LDPE semana 3	Excreta de <i>Galleria mellonella</i> PP semana 1
Figura A1	Figura A1



Excreta de *Galleria mellonella* PP semana 2



Excreta de *Galleria mellonella* PP semana 3