

Biodegradation of expanded polystyrene through the application of beetle larvae

Jhoana Yucra-Cuba Ing¹; Antonieta Rosas-Cuadros Ing¹; Yosheff Ortiz-Valdivia Dr¹; Danny Tupayachy-Quispe, Dr²; Jonathan Almirón, Dr²; Belinda Chavez, Mg² y María Vargas, Mg³

¹Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, yyucracu@unsa.edu.pe, arosascu@unsa.edu.pe, yortizv@unsa.edu.pe

²Universidad Católica de Santa María, Perú, dtupayachy@ucsm.edu.pe, jalmiron@ucsm.edu.pe, bchavez@ucsm.com

³Universidad Continental, Perú, mvgasv@continental.edu.pe

Abstract– This study evaluated the biodegradability of expanded polystyrene (EPS) using *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella*, and *Zophobas morio* larvae, identifying *Zophobas morio* as the most efficient species, with significantly higher consumption ($p<0.05$) and 65.64% degradation of EPS, without leaving residual microplastics in the excreta, according to FTIR analysis. The optimal diet for all species consisted of 25% EPS supplemented with wheat bran, suggesting that a nutritional substrate improves intestinal microbial activity and enzymatic degradation. The results support the use of *Zophobas morio* as a sustainable and effective bioremediation strategy for plastic waste management.

Keywords-- Biodegradation, expanded polystyrene, *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella*, *Zophobas morio*.

Biodegradación de poliestireno expandido mediante la aplicación de larvas coleópteros

Jhoana Yucra-Cuba Ing¹; Antonieta Rosas-Cuadros Ing¹; Yosheff Ortiz-Valdivia Dr¹; Danny Tupayachy-Quispe, Dr², Jonathan Almirón, Dr², Belinda Chavez, Mg² y María Vargas, Mg³

¹Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, yyucracu@unsa.edu.pe, arosascu@unsa.edu.pe, yortizv@unsa.edu.pe

²Universidad Católica de Santa María, Perú, dtupayachy@ucsm.edu.pe, jalmiron@ucsm.edu.pe, bchavez@ucsm.com

³Universidad Continental, Perú, mvargasv@continental.edu.pe

Resumen– Este estudio evaluó la capacidad de biodegradación del poliestireno expandido (EPS) mediante larvas de *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella* y *Zophobas morio*, identificando a *Zophobas morio* como la especie más eficiente, con un consumo significativamente mayor ($p < 0.05$) y una degradación del 65.64% del EPS, sin dejar microplásticos residuales en las excretas, según análisis FTIR. La dieta óptima para todas las especies consistió en un 25% de EPS complementado con salvado de trigo, lo que sugiere que un sustrato nutricional mejora la actividad microbiana intestinal y la degradación enzimática. Los resultados respaldan el uso de *Zophobas morio* como una estrategia de biorremediación sostenible y efectiva para la gestión de residuos plásticos.

Palabras clave: Biodegradación, poliestireno expandido, *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella*, *Zophobas morio*.

I. INTRODUCCIÓN

La producción y acumulación de residuos plásticos constituye uno de los principales desafíos ambientales del siglo XXI. A nivel mundial, se estima que se generan más de 300 millones de toneladas de desechos plásticos anualmente, de los cuales una fracción significativa corresponde a plásticos de un solo uso con un manejo posconsumo inadecuado [1]. Entre estos materiales, el poliestireno expandido (EPS), conocido comercialmente como tecnopor, destaca por sus propiedades de aislamiento y bajo peso, pero también por su difícil reciclaje mecánico y químico, su alta persistencia en el ambiente y su potencial para fragmentarse en microplásticos [2], [3], [4]. Su estructura, compuesta en un 98% por aire, dificulta su transporte y procesamiento en plantas de reciclaje convencionales, lo que conduce a que gran parte termine en rellenos sanitarios o, peor aún, en ecosistemas terrestres y acuáticos, donde su degradación puede superar los mil años [4].

Frente a esta problemática, las estrategias de gestión han evolucionado desde enfoques basados en la disposición final hacia la búsqueda de soluciones de valorización y degradación sostenible. En este contexto, la biorremediación ha surgido como una alternativa prometedora, aprovechando la capacidad de ciertos organismos para metabolizar o transformar contaminantes complejos [5]. Recientemente, se ha descubierto que varias especies de insectos en su estado larvario poseen una

notable habilidad para consumir y degradar diversos polímeros sintéticos. En particular, larvas de los coleópteros *Tenebrio molitor* y *Zophobas morio*, y del lepidóptero *Galleria mellonella*, han demostrado ser agentes biodegradadores eficaces de plásticos como el polietileno (PE) y el poliestireno (PS) [6], [7]. El mecanismo implica no solo una fragmentación mecánica durante la ingestión, sino una verdadera despolimerización mediada por la actividad enzimática del microbiota intestinal de las larvas [8], [9]. La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) ha sido una herramienta fundamental para confirmar estos procesos, al permitir identificar la desaparición de los grupos funcionales característicos del plástico en las excretas [8].

Si bien existen numerosos estudios que abordan la biodegradación del EPS por una sola especie, existe una carencia de investigaciones que realicen una evaluación comparativa y cuantitativa bajo condiciones experimentales estandarizadas, que permita identificar de manera objetiva la especie con mayor eficiencia y potencial de aplicación [10]. Además, es crucial no solo medir el consumo, sino también verificar la autenticidad del proceso de biodegradación mediante el análisis de los residuos excretados, para descartar la simple trituración y excreción de microplásticos.

Por lo tanto, este trabajo de investigación se realizó con el objetivo de evaluar y comparar la capacidad de biodegradación del poliestireno expandido (EPS) por parte de larvas de *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella* y *Zophobas morio* en condiciones de laboratorio controladas. Los hallazgos de este estudio pretenden aportar evidencia científica sólida para el desarrollo de estrategias biotecnológicas innovadoras y escalables en la gestión sostenible de residuos plásticos persistentes.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño experimental de nivel explicativo, dirigido a evaluar la capacidad biodegradadora del poliestireno expandido (EPS) mediante el uso de larvas de tres especies de insectos: *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella* y *Zophobas*

morio. Se manipuló la variable independiente, representada por la proporción de EPS en la dieta larval, estableciendo cinco tratamientos: 100%, 75%, 50% y 25% de EPS, complementado con salvado de trigo, además de un grupo control alimentado exclusivamente con salvado, tal como se muestra en la Tabla I.

TABLA I
VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES

Variable	Dimensión	Indicador
Variable independiente (Larvas de <i>Tenebrio molitor</i> , <i>Galleria mellonella</i> y <i>Zophobas morio</i>)	Alimentación	% de EPS
		% de salvado de trigo
	Características físicas	Tamaño (mm)
		Peso (g)
	Características biológicas	Tiempo de vida (días)
		% de larvas vivas
Variable dependiente (Biodegradación de EPS)	Biodegradación	Peso inicial de EPS (mg)
		Peso final de EPS (MG)
		% de reducción de EPS

La muestra estuvo conformada por un total de 540 larvas (180 individuos por especie), adquiridas de criaderos especializados ubicados en Arequipa (*T. molitor*), Trujillo (*G. mellonella*) y Lima (*Z. morio*), tal como se ve en la Tabla II. Previo al estudio, los especímenes se aclimataron y reprodujeron en condiciones controladas de laboratorio. El material por biodegradar consistió en planchas de EPS comercial de un único lote, cortadas en cubos de masa conocida.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DE LAS LARVAS

		
		
<i>Tenebrio Monitor</i>	<i>Galleria mellonella</i>	<i>Zophobas morio</i>
Gusano de harina	Gusano de cera	Gusano rey
Tamaño: 18 mm de largo y 4 mm de ancho	Tamaño: 15 mm de largo y 5 mm de ancho	Tamaño: 34 mm de largo y 12 mm de ancho
Masa: 0.8206 g	Masa: 0.7218 g	Masa: 5.8223 g

El estudio se llevó a cabo durante 32 días en cajas de vidrio compartimentadas, mantenidas en oscuridad y con condiciones ambientales controladas ($25 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $65 \pm 5\%$ de humedad relativa). Cada tres días se realizó el reemplazo y pesaje del EPS para cuantificar el consumo, y se recolectaron las excretas para su análisis posterior. La variable dependiente, la biodegradación del EPS, se evaluó mediante dos vías: (1) la medición de la masa de EPS consumida, y (2) el análisis espectral de las excretas mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) utilizando un espectrofotómetro Thermo Scientific™ Nicolet™ iS50, con el fin de detectar la posible presencia de residuos poliméricos (microplásticos).

Los datos cuantitativos de consumo fueron procesados estadísticamente utilizando el software SPSS versión 26. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para determinar la existencia de diferencias significativas en el consumo entre tratamientos y entre especies, seguido de una prueba Post Hoc (Tukey) para identificar las diferencias específicas. El nivel de significancia se estableció en $p < 0.05$.



Fig. 1 EPS antes y después de ser biodegradado.

A. Capacidad de consumo

Para evaluar el consumo de poliestireno expandido (EPS), se implementó un diseño completamente al azar adaptado de [11]. Las larvas fueron asignadas aleatoriamente a cuatro tratamientos dietéticos con diferentes proporciones de EPS (100%, 75%, 50% y 25%), cada uno con tres réplicas, además de un grupo control alimentado exclusivamente con salvado de trigo. A cada réplica se le proporcionó una masa inicial de EPS de aproximadamente 1.4 g, correspondiente al 100% del tratamiento, mientras que el grupo control recibió 1 g de salvado. Cada tres días, durante 32 días, se registró la masa residual de EPS para cuantificar el consumo por especie y se recolectaron las excretas para su análisis posterior.

B. Capacidad biodegradadora

La capacidad biodegradadora del poliestireno expandido entre las tres especies de larvas se comparó mediante un análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los datos de consumo de EPS obtenidos experimentalmente.

C. Análisis de excretas

Con el objetivo de confirmar la biodegradación completa y descartar la mera fragmentación en microplásticos, se analizaron las excretas de las tres especies mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Las muestras fecales de cada especie y tratamiento se agruparon al final del experimento, se secaron y se trituraron para homogenizarlas. Para ello se utilizó un espectrofotómetro Thermo Scientific™ Nicolet™ iS50 FTIR. Los espectros obtenidos fueron procesados e interpretados con el software OMNIC Anywhere para identificar la presencia o ausencia de residuos poliméricos característicos del poliestireno expandido.

III. RESULTADOS

A. Capacidad de consumo

La evaluación comparativa del consumo de EPS reveló diferencias marcadas entre las especies. En la Tabla III muestra un resumen de como presento el consumo por parte de *Zophobas morio* exhibiendo el mayor consumo absoluto y la eficiencia relativa más alta en todos los tratamientos, alcanzando una reducción de masa del 89.62% bajo una dieta del 25% de EPS. *Galleria mellonella* presentó un consumo intermedio, con su máxima eficiencia (9.52%) también en el tratamiento del 25% de EPS. Por su parte, *Tenebrio molitor* registró el menor consumo absoluto, aunque su mayor eficiencia relativa (3.07%) coincidió igualmente con dicha proporción dietética. Notablemente, para las tres especies, la máxima eficiencia de biodegradación, cuantificada como el porcentaje de reducción de masa del EPS, se obtuvo en el tratamiento que combinaba un 25% de EPS con un 75% de salvado de trigo, lo que indica que una dieta mixta potencia significativamente el proceso de consumo y degradación del polímero.

TABLA III
CARACTERÍSTICAS DE LAS LARVAS

Especie	Tratamiento (%EPS)	Consumo de EPS (gr)	Variación de Masa (%)
<i>Tenebrio molitor</i>	100 % EPS	0.0246	1.77
	75% EPS	0.0096	0.9
	50% EPS	0.0061	0.87
	25% EPS	0.011	3.07
<i>Galleria mellonella</i>	100 % EPS	0.0631	4.46
	75% EPS	0.051	4.82
	50% EPS	0.0208	2.96
	25% EPS	0.0353	9.52
<i>Zophobas morio</i>	100 % EPS	0.7361	52.82
	75% EPS	0.6151	58.35
	50% EPS	0.4408	61.77
	25% EPS	0.3148	89.62

B. Capacidad biodegradadora

El análisis estadístico mediante ANOVA de un factor, seguido de una prueba Post Hoc de Tukey, permitió identificar diferencias significativas en la capacidad de consumo de poliestireno expandido (EPS) tanto entre las dietas como entre las especies de larvas evaluadas. En la Tabla IV se observa para cada especie por separado, el tratamiento con una dieta mixta del 25% de EPS y 75% de salvado de trigo resultó en el consumo más eficiente, siendo estadísticamente superior ($p < 0.05$) a las dietas con mayor proporción de polímero. Al comparar globalmente las especies, *Zophobas morio* demostró una capacidad de consumo significativamente mayor ($p < 0.001$) que *Tenebrio molitor* y *Galleria mellonella*, estas últimas sin diferencias estadísticas entre sí ($p > 0.05$). Estos resultados establecen a *Z. morio*, bajo una dieta suplementada con salvado, como el agente más eficaz para la biodegradación de EPS bajo las condiciones experimentales.

TABLA IV
RESUMEN DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA

Especie	<i>Tenebrio molitor</i>	<i>Galleria mellonella</i>	<i>Zophobas morio</i>
Tratamiento Óptimo (EPS:Salvado)	25% : 75%	25% : 75%	25% : 75%
Eficiencia Máxima (%Reducción)	3.07%	9.52%	89.62%
Resultado de ANOVA	Dif. significativa ($p=0.002$). El tratamiento 25% EPS es superior ($p=0.000$)	Dif. significativa ($p=0.033$). El tratamiento 25% EPS es superior ($p=0.029$).	Dif. altamente significativa ($p=0.000$). El tratamiento 25% EPS es superior ($p=0.001$).
Comparación (Post Hoc)	No significativamente diferente de <i>G. mellonella</i> ($p=0.480$). Inferior a <i>Z. morio</i> ($p=0.000$)	No significativamente diferente de <i>T. molitor</i> ($p=0.480$). Inferior a <i>Z. morio</i> ($p=0.000$)	Significativamente superior a <i>T. molitor</i> y <i>G. mellonella</i> ($p=0.000$).

C. Análisis de residuos de EPS

FTIR del Poliestireno Expandido (EPS)

La Fig. 2 muestra el espectro de referencia del EPS puro, presentando tres bandas características: un grupo de bandas entre 2800 y 3200 cm^{-1} , atribuibles a vibraciones de estiramiento de enlaces C-H; un segundo grupo entre 1400 y 1600 cm^{-1} , correspondiente a vibraciones de enlaces C-C del esqueleto polimérico y del anillo aromático; y un tercer grupo entre 700 y 800 cm^{-1} , asociado a deformaciones fuera del plano del anillo aromático del estireno. La presencia o desaparición de estas bandas en los espectros de las excretas se empleó como indicador clave de la degradación química del polímero.

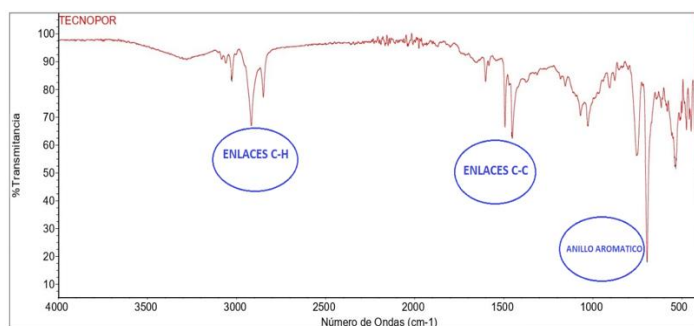


Fig. 2 FTIR del poliestireno expandido

FTIR de Excretas de *Tenebrio molitor*

El análisis FTIR de las excretas de *Tenebrio molitor* reveló un gradiente de degradación del poliestireno expandido (EPS) dependiente de la composición de la dieta. En la Fig. 3, las muestras correspondientes a la dieta T1 (100% EPS), se mantuvieron las bandas características del polímero intacto en las regiones de 2800-3200 cm^{-1} (estiramientos C-H) y 700-800 cm^{-1} (anillo aromático), aunque con alteraciones significativas en la transmitancia y en la región de 1400-1600 cm^{-1} (enlaces C-C), indicando una modificación química inicial.

Para las dietas T2 (75% EPS) y T3 (50% EPS), los espectros mostraron perfiles similares entre sí, con una marcada atenuación o desaparición de los picos representativos en las tres regiones espectrales clave (2800-3200, 1400-1600 y 700-800 cm^{-1}), lo que sugiere una despolimerización avanzada. De manera notable, en la dieta T4 (25% EPS), los picos característicos en las regiones de 2800-3200 cm^{-1} y 700-800 cm^{-1} desaparecieron por completo. Esta ausencia de las señales del anillo aromático y de los enlaces C-H del polímero original indica que la biodegradación fue más efectiva y completa bajo esta condición dietética mixta, respaldando la hipótesis de que la suplementación con salvado de trigo (75%) favorece significativamente la degradación metabólica del EPS.

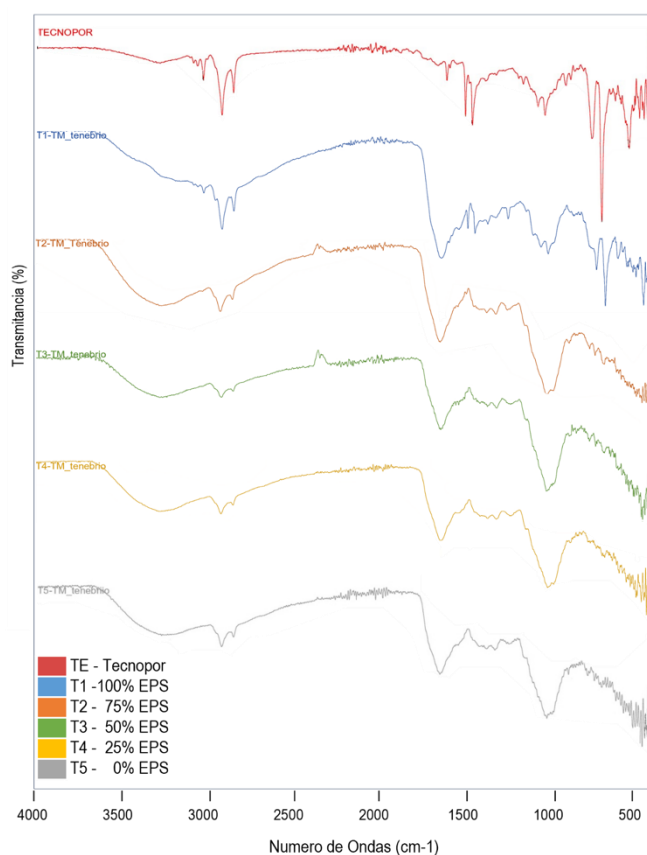


Fig. 3 Comparación de dietas y poliestireno expandido en *Tenebrio molitor*.

FTIR de Excretas de *Zophobas morio*

Los espectros FTIR de las excretas de *Zophobas morio* evidenciaron una degradación progresiva del EPS en función de la dieta. En la Fig. 4, muestra para la dieta T1 (100% EPS), se conservaron los picos atribuibles a los enlaces C-H en la región de 2800-3200 cm^{-1} , aunque se registraron alteraciones significativas en la transmitancia y morfología de las bandas en los rangos de 1400-1600 cm^{-1} (enlaces C-C) y 700-800 cm^{-1} (anillo aromático), indicando una transformación química inicial del polímero.

Los espectros correspondientes a las dietas T2 (75% EPS) y T3 (50% EPS) exhibieron perfiles espectrales notablemente similares, mostrando una continua disminución en la intensidad de las bandas características. De manera concluyente, en las excretas de la dieta T4 (25% EPS), no se detectaron los picos representativos en ninguna de las tres regiones críticas: desaparecieron las señales de los enlaces C-H (2800-3200 cm^{-1}) y C-C (1400-1600 cm^{-1}), así como las bandas características del anillo bencénico del estireno (700-800 cm^{-1}). Este resultado confirma una biodegradación extensa y prácticamente completa del EPS cuando *Z. morio* es alimentado con una dieta mayoritaria de salvado de trigo, lo que sugiere una alta eficiencia de su sistema digestivo y microbiota asociada para metabolizar el polímero.

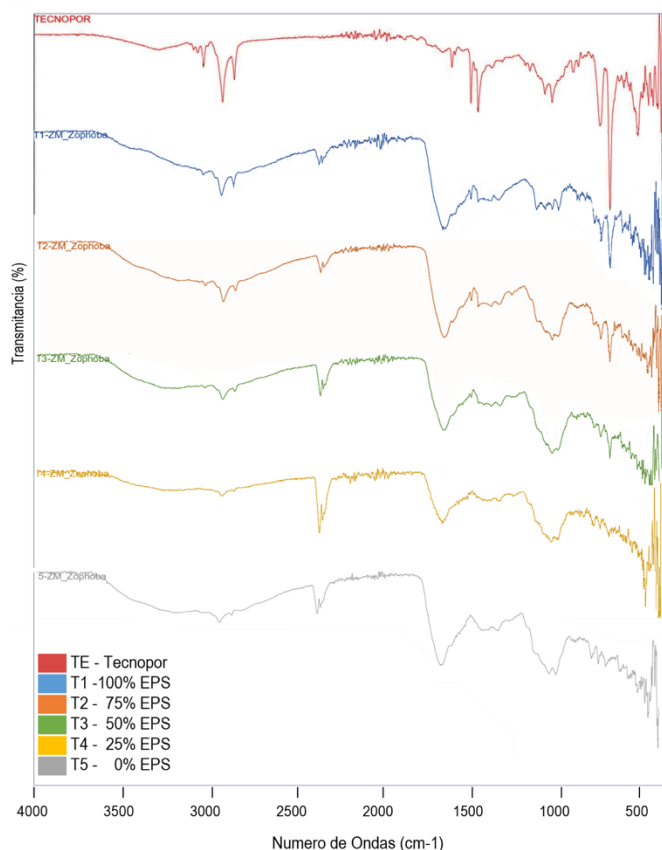


Fig. 4 Comparación de dietas y poliestireno expandido en *Zophobas morio*.

FTIR de Excretas de *Galleria mellonella*

El análisis espectral de las excretas de *Galleria mellonella* reveló un patrón de degradación distinto al observado en las otras especies. En la Fig. 5, los espectros correspondientes a las cuatro dietas (T1 a T4) mostraron perfiles muy similares entre sí. Se registraron ligeras variaciones en la región de 2800-3200 cm^{-1} (enlaces C-H) desde la dieta T1 (100% EPS), las cuales se mantuvieron constantes en los tratamientos subsiguientes. La atenuación de las bandas en la región de 700-800 cm^{-1} (anillo aromático) mostró una reducción progresiva, pero paulatina, a lo largo de los tratamientos. A diferencia de lo observado en *T. molitor* y *Z. morio*, las bandas características de los enlaces C-C en la región de 1400-1600 cm^{-1} exhibieron una alteración moderada desde el primer tratamiento, sin presentar una disminución drástica en intensidad en las dietas con mayor contenido de salvado. Este patrón sugiere que, si bien *G. mellonella* modifica la estructura del EPS, el proceso de despolimerización y ruptura del esqueleto carbonado podría ser menos eficiente o seguir una vía metabólica diferente en comparación con las otras dos especies.

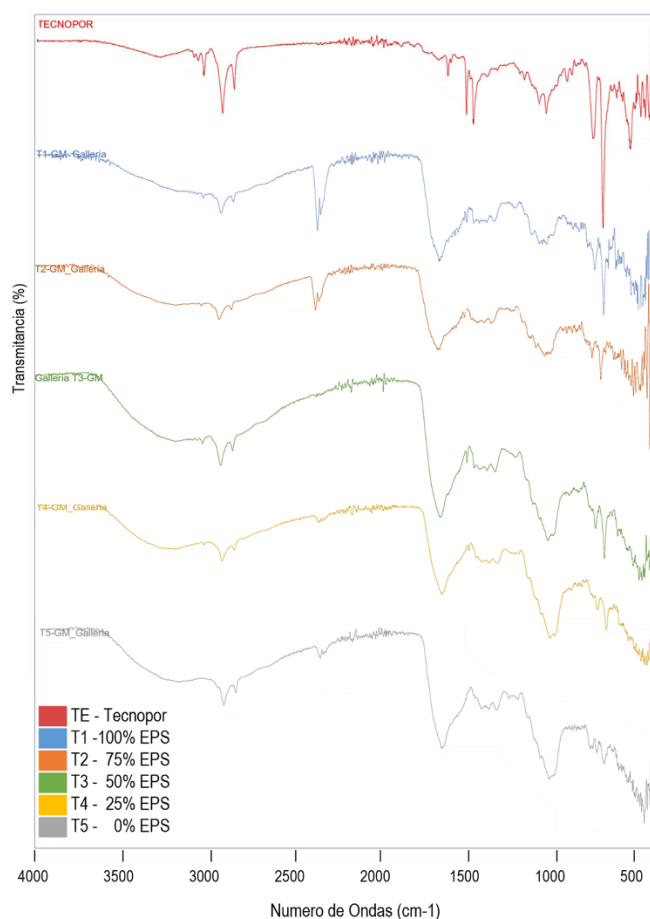


Fig. 5 Comparación de dietas y poliestireno expandido en *Galleria mellonella*.

III. DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio confirman la capacidad de larvas de *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella* y *Zophobas morio* para biodegradar poliestireno expandido (EPS) en condiciones de laboratorio, mostrando además una marcada superioridad de *Z. morio* en términos de consumo y eficiencia degradativa. Estos hallazgos se alinean con la creciente evidencia de que ciertos insectos pueden asimilar polímeros sintéticos gracias a la acción combinada de su sistema digestivo y su microbiota intestinal [8], [9]. La variación en la eficiencia observada entre especies, con *Z. morio* siendo significativamente más eficaz, puede atribuirse a diferencias en su masa corporal, tasa metabólica y la composición específica de su microbioma degradador, tal como sugieren estudios previos [12], [13].

Un hallazgo clave de esta investigación fue la influencia decisiva de la composición de la dieta. El tratamiento más eficaz para las tres especies fue consistentemente aquel con un 25% de EPS y 75% de salvado de trigo. Este resultado sugiere que el salvado, más allá de ser una fuente nutricional, probablemente actúa como un bioestimulante. Podría facilitar la digestión mecánica del plástico, proporcionar nutrientes

esenciales para el mantenimiento de la larva y su microbiota, o inducir la expresión de enzimas específicas involucradas en la despolimerización. Este efecto sinérgico entre un sustrato plástico y uno natural concuerda con observaciones de que la biodegradación se optimiza cuando el plástico no es la única fuente de carbono [14].

El análisis por FTIR proporcionó evidencia química sólida de una biodegradación verdadera y no de una simple fragmentación física. La atenuación o desaparición de los picos característicos del EPS, especialmente de las bandas del anillo aromático ($700\text{-}800\text{ cm}^{-1}$), en las excretas de *T. molitor* y *Z. morio* alimentados con la dieta mixta, indica una despolimerización extensa y una ruptura de la estructura central del estireno [9]. El patrón diferente observado en *G. mellonella*, con alteraciones menos marcadas, sugiere variaciones en las rutas metabólicas o en la eficiencia de su consorcio microbiano, lo que podría explicar su menor tasa de consumo en comparación con *Z. morio*.

La superioridad de *Z. morio* está respaldada no solo por su mayor consumo absoluto, sino también por la completa remoción de las firmas espectrales del EPS en sus excretas bajo la dieta óptima. Esta eficiencia puede relacionarse con factores intrínsecos como su mayor tamaño y un tracto digestivo con un tiempo de retención más prolongado, permitiendo una acción enzimática y microbiana más extensa. Además, estudios como el de [12] apoyan la hipótesis de que el microbiota intestinal de *Z. morio* alberga consorcios bacterianos particularmente adaptados para degradar polímeros complejos.

Si bien factores como la densidad larval [15], [16] y las propiedades del material [17], [18] han sido identificados como moduladores del proceso, nuestros resultados subrayan que la selección de la especie y la formulación de una dieta co-sustrato son parámetros críticos para maximizar la biodegradación. La ausencia de microplásticos detectables en las excretas de las dietas más eficientes es un resultado prometedor, pues minimiza el riesgo de transferencia trófica de partículas plásticas, un problema central asociado a otras estrategias de degradación.

En conclusión, este estudio posiciona a *Zophobas morio*, especialmente cuando se cría con una dieta suplementada con salvado, como un agente de biodegradación excepcionalmente eficaz para el EPS. Los resultados enfatizan la importancia de abordar la gestión de este contaminante desde una perspectiva biotecnológica que integre la selección del organismo, la optimización de las condiciones dietéticas y la caracterización de los mecanismos microbianos subyacentes. Futuras investigaciones deberían dirigirse a escalar el proceso, aislar y caracterizar las cepas bacterianas y enzimas clave, y evaluar la toxicidad de los metabolitos generados, con el fin de desarrollar aplicaciones viables y seguras dentro de un marco de economía circular.

IV. CONCLUSIONES

La especie *Zophobas morio* demostró ser el agente de biodegradación más eficiente para el poliestireno expandido (EPS) bajo las condiciones experimentales. Esta conclusión se sustenta en dos evidencias principales: primero, presentó el mayor consumo promedio de EPS normalizado por su peso corporal (11.26%), superando significativamente a *Galleria mellonella* (7.54%) y *Tenebrio molitor* (2.01%). Segundo, el análisis estadístico (ANOVA y prueba Post Hoc) confirmó que su capacidad de consumo fue significativamente mayor ($p < 0.001$) que la de las otras dos especies, las cuales no mostraron diferencias estadísticas entre sí ($p > 0.05$). Adicionalmente, la máxima eficiencia de consumo para las tres especies se logró con una dieta compuesta por un 25% de EPS y un 75% de salvado de trigo, donde *Z. morio* alcanzó una reducción de masa del 15.26%.

El análisis mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) de las excretas larvales confirmó que el proceso no generó microplásticos residuales de poliestireno. La atenuación o desaparición de las bandas características del EPS, en particular las correspondientes al anillo aromático ($700\text{-}800\text{ cm}^{-1}$), en los espectros de las heces de todas las especies y tratamientos, evidencia una biodegradación verdadera que altera la estructura química del polímero. Este resultado es crucial, ya que descarta la mera fragmentación física y valida la transformación metabólica del plástico en compuestos distintos.

REFERENCIAS

- [1] ONU, "Informe de la ONU sobre contaminación por plásticos advierte sobre falsas soluciones y confirma la necesidad de una acción mundial urgente." Accessed: Dec. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/informe-de-la-onu-sobre-contaminacion-por-plasticos>
- [2] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made," *Sci Adv*, vol. 3, no. 7, Jul. 2017, doi: 10.1126/SCIADV.1700782/SUPPL_FILE/1700782_SM.PDF.
- [3] Ministerio del Ambiente, "Cifras del mundo y el Perú | Menos Plástico Más Vida." Accessed: Dec. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.minam.gob.pe/menos-plastico-mas-vida/cifras-del-mundo-y-el-peru/>
- [4] R. Carabaño Rodríguez, "Caracterización y análisis comparativo del comportamiento medioambiental de los materiales de aislamiento térmico utilizados en la envolvente del edificio, en función del sistema constructivo y de la situación geográfica," 2015, doi: 10.20868/UPM.THESIS.40885.
- [5] R. C. Hale, M. E. Seeley, M. J. La Guardia, L. Mai, and E. Y. Zeng, "A Global Perspective on Microplastics," *J Geophys Res Oceans*, vol. 125, no. 1, p. e2018JC014719, Jan. 2020, doi: 10.1029/2018JC014719.
- [6] L. Yang *et al.*, "Biodegradation of expanded polystyrene and low-density polyethylene foams in larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae): Broad versus limited extent depolymerization and microbe-dependence versus independence," *Chemosphere*, vol. 262, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.127818.
- [7] A. Rodríguez-Carreón, Y. Ortiz-Rivera, C. C. Hernández-Peña, and C. Figueroa, "Biodegradación de espumas plásticas por larvas de insectos: ¿una estrategia sustentable?," *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 24, May 2021, doi: 10.22201/FESZ.23958723E.2021.311.
- [8] A. F. Arias-González, L. D. Gómez-Méndez, and A. Sáenz-Aponte, "Consumption and Digestion of Plastics by Greater Hive Moth Larvae,"

- Insects* 2024, Vol. 15, Page 645, vol. 15, no. 9, p. 645, Aug. 2024, doi: 10.3390/INSECTS15090645.
- [9] H. H. Lin and H. H. Liu, "FTIR Analysis of Biodegradation of Polystyrene by Intestinal Bacteria Isolated from *Zophobas Morio* and *Tenebrio Molitor*," *Proceedings of Engineering and Technology Innovation*, vol. 17, pp. 50–57, 2021, doi: 10.46604/PETI.2021.5450.
 - [10] E. A. Di Liberto, G. Battaglia, R. Pellerito, G. Curcuruto, and N. T. Dintcheva, "Biodegradation of Polystyrene by Plastic-Eating Tenebrionidae Larvae," *Polymers* 2024, Vol. 16, Page 1404, vol. 16, no. 10, p. 1404, May 2024, doi: 10.3390/POLYM16101404.
 - [11] R. L. Albarracín Liendo, "Evaluación de las condiciones biológicas y ambientales en *Tenebrio molitor* que influye en la biodegradación del poliestireno," *Universidad Privada de Tacna*, 2020, Accessed: Dec. 11, 2025. [Online]. Available: <http://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/1701>
 - [12] N. García Campos, "Evaluación del impacto ambiental de la aplicación de un plan de gestión posconsumo de Poliestireno Expandido (EPS) utilizado en el envase de alimentos en Colombia," 2019, *Universidad EAN*. Accessed: Dec. 11, 2025. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10882/9794>
 - [13] B. N. Siesquen Angulo and L. M. Trujillo Ventura, "Utilización del gusano de cera (*Galleria mellonella*) para la biodegradación de los contenedores de poliestireno expandido (tecnopor), Moyobamba, 2019," 2019.
 - [14] S. S. Yang *et al.*, "Biodegradation of polystyrene wastes in yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus): Factors affecting biodegradation rates and the ability of polystyrene-fed larvae to complete their life cycle," *Chemosphere*, vol. 191, pp. 979–989, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.10.117.
 - [15] Marby Lizeth Cardozo Sánchez, "Biodegradación del poliestireno expandido por larvas de *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae), en condiciones de laboratorio." Accessed: Dec. 11, 2025. [Online]. Available: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/34873>
 - [16] J. J. Peña Valdez and S. S. Saavedra Chavez, "Efectividad del *Tenebrio molitor* y *Alphitobius diaperinus* en la biodegradación de poliestireno expandido y polietileno de baja densidad," 2024.
 - [17] E. Mapfumo *et al.*, "Superworm (Coleoptera: Tenebrionidae, *Zophobas morio*) degradation of UV-pretreated expanded polystyrene," *Facet*, vol. 9, p. 0075, 2024, doi: 10.1139/FACETS-2023-0075.
 - [18] P. A. Daviran Yance, "Biodegradación de la Espuma de Poliestireno por la larva del *Tenebrio molitor* para la producción de Abono, 2017," 2017.