

Entomoremediación: Influencia de una Dieta Plástica en el Desarrollo de Tenebrio Molitor para Generar Biofertilizante

Bastidas-Proaño, Daniela^{1,*} 

¹Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Biológicas, Quito, Ecuador

Resumen: El plástico es ampliamente utilizado y responsable de impactos ambientales negativos. Tal es el caso del poliestireno expandido (EPS), que presenta desafíos de revalorización por su baja densidad. Aunque ciertas larvas de insecto, como tenebrio molitor, han demostrado la capacidad de mineralizar plásticos, la insecticultura de estos aún se enfoca en obtener proteína sostenible y biofertilizante. En este estudio, se investiga la influencia de una dieta de EPS en el desarrollo larval de *T. molitor* durante 6 meses, y se examina cómo la dieta afecta el volumen de biofertilizante recolectado en este lapso. Se desarrollaron ensayos con tres dietas, realizando mediciones y recolección de material de manera periódica. Los resultados indican que las larvas alimentadas con un sustrato combinado, así como aquellas con una dieta orgánica, demuestran tasas de supervivencia de hasta 66%. La longitud final es inferior en la dieta inorgánica (112mm), y en las otras dietas superan los 162 mm. Las larvas de una dieta inorgánica no progresaron a pupa, demostraron un Factor de Conversión de Alimento desalentador (3,87) y produjeron menor cantidad de frass/biofertilizante (1,28g), en comparación con la dieta combinada que registró 5,11g. Los datos sugieren que la entomoremediación plástica funciona óptimamente si se cría larvas en un sustrato combinado de EPS y elementos orgánicos. Dicha condición no solo produce resultados positivos, sino que se alinea con los principios de economía circular. En consecuencia, se demuestra que una dieta combinada es ideal para abordarla como opción en el tratamiento de residuos de EPS.

Palabras clave: Entomoremediación, Frass, Insecticultura, Poliestireno expandido, Residuos plásticos

Entomoremediation: Influence of a Plastic Diet on the Development of Tenebrio Molitor to Generate Biofertilizer

Abstract: Plastic is widely used and responsible for negative environmental impacts. Such is the case of expanded polystyrene (EPS), a material that presents revaluation challenges due to its low density. The ability of certain insects larvae, such as *Tenebrio molitor*, to mineralize plastic has been demonstrated, although its insect farming still focuses on obtaining sustainable protein and biofertilizer. This study investigates the influence of an EPS diet on the larval development of *T. molitor* for 6 months and examines how the diet affects the volume of biofertilizer collected in this period. Trials were developed with three diets, performing periodic measurements and collection of material. The results indicate that larvae fed a combined substrate, as well as those fed an organic diet, demonstrate survival rates of up to 66%. The final length is lower in the inorganic diet (112 mm), and in the other diets it exceeds 162 mm. Larvae on an inorganic diet did not progress to pupal stage, demonstrated a disappointing lowest Feed Conversion Ratio (3.87) and produced less frass (1.28g), compared to the combined diet which recorded 5.11g. The data suggest that plastic entomoremediation works optimally if larvae are raised on a combined diet substrate of EPS and organic elements. This condition not only produces positive results, but also is aligned well with the principles of the circular economy. Therefore, a combined diet proves to be an ideal candidate for tackling EPS waste.

Keywords: Entomoremediation, expanded polystyrene, frass, insecticulture, plastic waste

1. I INTRODUCCIÓN

En el mundo, el plástico ha adquirido un rol dominante, a tal punto que es uno de los materiales más usados y versátiles. Es tal su importancia que el año 2016 su producción alcanzó la

cifra de 242 millones de toneladas, y para el 2030 se espera que esa cifra aumente en un 40% (Haque, 2019). Lamentablemente, a causa de la pandemia de COVID-19, los proyectos y esfuerzos que se realizaban por reducir la producción de plástico, se vieron reducidos a causa de la

*ddbastidas@uce.edu.ec; danidome.25@gmail.com

Recibido: 22/11/2023

Aceptado: 28/03/2024

Publicado en línea: 31/05/2024

10.33333/tp.vol53n2.01

CC 4.0

emergencia sanitaria (Patrício et al., 2020). A pesar de tener una importante utilidad, el hecho que el plástico no sea un material biodegradable es una desventaja. Es por ello que su acumulación en el ambiente genera una preocupación considerable.

Las características de los plásticos hacen factible que los residuos se acumulen en vertederos, y en muchos de los casos, terminen afectando ecosistemas como los cuerpos de agua. Además, no solo los residuos plásticos generan contaminación, sino que el ambiente se ve afectado por la presencia de aditivos químicos, los mismos que se colocan en este material, y a los propios procedimientos de producción, reciclaje y desecho del plástico. Estos procedimientos, si no se regulan eficazmente, no solo representan adversidades ambientales, sino que pueden impactar la salud humana e incluso mercados económicos mundiales (Batatineh, 2020; Chen et al., 2021; Lebreton y Andrady, 2019).

En Ecuador, la generación de residuos *per capita* alcanza los 0,58Kg al día, de estos el 11% corresponde a una fracción plástica. Lamentablemente, esta fracción plástica, como el resto de los residuos, se dispone mayoritariamente en vertederos a cielo abierto (Solíz, 2015). Solo un pequeño porcentaje, el 3,7% de los residuos, se aprovecha gracias al trabajo de recicladoras de base (Solíz, 2015), pero esta labor aún resulta insuficiente para abordar el problema de acumulación de residuos plásticos.

Desde hace algunos años se planteó el uso de metodologías biotecnológicas para buscar soluciones sostenibles y efectivas para el tratamiento de desechos plásticos. Entre estas herramientas está el manejo de microbiota intestinal de invertebrados como los insectos (An et al., 2023; Tan et al., 2021; Yang et al., 2015).

Pero no todos los materiales plásticos son susceptibles a revalorización en un tratamiento sostenible, económicamente viable o fácilmente accesible. Entre estos materiales se encuentra el Poliestireno Expandido (EPS), un plástico comúnmente usado como contenedor térmico y que, debido a su baja densidad, no es atractivo para procesos tradicionales de reciclaje o revalorización (Arriola y Velásquez, 2013; Cella et al., 2018; Haque, 2019; Ramli et al., 2019).

En relación con esto, Gan et al. (2021), Jiang et al. (2021) y Yang et al. (2015) demostraron que algunos insectos son capaces de mineralizar plástico a través de su tracto digestivo. Los géneros de escarabajo (Coleóptera), *Tenebrio* y *Zophobas*, son los que más destacan.

Actualmente, parte de la insecticultura se enfoca en satisfacer un mercado creciente de alimentos sostenibles y altos en proteína, destinados tanto al consumo animal como humano. Este enfoque tiene implicaciones socioeconómicas y ambientales importantes (van Huis et al., 2013).

De manera general, se conoce que la producción a gran escala de insectos genera una huella ambiental menor en comparación de otros animales de granja (Grau et al., 2017; Oonincx et al., 2019). Sin embargo, al igual que otro proceso,

la insecticultura genera residuos. El “frass”, una mezcla de fecas, exuvias y restos de alimentos (Official Journal of the European Union, 2021), puede representar hasta 20 veces la producción total de biomasa aprovechable de los insectos criados, ya que solo el 2% del alimento consumido se convertirá en biomasa aprovechable (Blakstad, 2021; Poveda, 2021).

La cría de insectos, al centrarse en la sostenibilidad, abre la posibilidad de utilizar el frass como un biofertilizante en la actividad agrícola, lo que alinea a esta práctica con un modelo de economía circular. El frass contiene proporciones de quitina, que le otorgan propiedades disuasorias de insectos, hongos y nemátodos a las plantas. Incluso, su capacidad natural para proporcionar fósforos y nitrógeno al suelo, lo convierte en una opción importante para fortalecer una agricultura sostenible (Gärtling et al., 2020; Poveda, 2021) y participar en un ciclo de producción circular de biofertilizantes.

Por otro lado, los insectos pueden formar parte de proyectos de entomoremediación. La especie modelo es *Hermetia illucens*, ampliamente estudiada por su efectiva capacidad de bioconvertir residuos sólidos orgánicos (Bulak et al., 2018); y *Tenebrio molitor*, que se conoce que tiene la capacidad de alimentarse de poliestireno y polietileno, y otras especies, puede contribuir a la entomoremediación a través de la degradación de residuos orgánicos o inorgánicos como el plástico (Brandon et al., 2018).

Existen variados estudios que confirman que algunas larvas de insectos son capaces de sobrevivir a una dieta inorgánica plástica (Yang et al., 2023; Zielińska et al., 2021), pero estos no se enfocan en cómo dicha dieta influye en el desarrollo larval, y por ende, en la obtención de frass bajo un sistema de economía circular que involucre residuos plásticos y la biomasa necesarios para obtener biofertilizante.

Por lo tanto, la intención de este estudio es investigar y detallar la influencia de una dieta de poliestireno expandido en el desarrollo de larvas de *Tenebrio molitor*, y determinar cómo dicha dieta influye en el crecimiento y viabilidad larval; y en la obtención de biofertilizante.

2. METODOLOGÍA

Este estudio se caracteriza por ser cuantitativo, experimental y longitudinal. La población se consideró infinita, por ello se preparó una muestra de 1200 individuos de larvas de *Tenebrio molitor*, con una edad aproximada de 15 días. Estas larvas se obtuvieron de una granja en Quito. El trabajo se llevó a cabo en esta misma ciudad, por un tiempo que abarcó desde agosto del 2022 hasta enero del 2023.

2.2 Tratamientos y dietas

Se clasificaron las larvas en tres tratamientos o dietas (Figura 1).

- 1) Dieta orgánica: alimento a base de avena en hojuelas; 2) Dieta combinada: Formada de 50% de avena y 50%



Figura 1. Imágenes de las dietas a las que se sometió larvas de *Tenebrio molitor* por seis meses. La flecha señala a una larva en cada tratamiento.

poliestireno expandido; 3) Dieta inorgánica: conformado en su totalidad por poliestireno expandido.

Debido a las características propias de las larvas de insectos como el tamaño reducido y a la sensibilidad a la manipulación; no es práctico criar elementos de manera individual por un tiempo prolongado. Por ello, cada tratamiento contó con ocho repeticiones en las cuales se incluyeron 50 larvas de *Tenebrio molitor*. Para proveer de hidratación a las larvas, se añadieron pequeños trozos, de hasta 2 gramos de peso, de vegetales previamente desinfectados. Las proporciones de las dietas se midieron con una gramera de dos decimales, y se registraron tanto la cantidad de alimento agregado como la cantidad de residuos extraída en cada repetición.

2.3. Cálculos

Con los registros semanales se realizaron los cálculos correspondientes a cada repetición de cada tratamiento. Se calculó, a) Tasa de supervivencia de larvas al tratamiento (*TS*); b) Tasa de pupa (*TP*); c) Tiempo promedio para convertirse en pupa (*TPP*) y d) Factor de conversión de alimento (*FCA*); y se sumó la cantidad en gramos de frass total de cada tratamiento.

$$TS(\%) = \frac{\text{Pupas+larvas vivas}}{\text{Total de larvas al inicio}} * 100 \quad (1)$$

$$TP(\%) = \frac{\text{Número de pupas registradas en el estudio}}{\text{Total de larvas al inicio del estudio}} * 100 \quad (2)$$

$$TPP(\text{días}) = \frac{\text{Fecha inicial del proyecto} - \text{Fecha de registro de pupa}}{\text{Número de pupas}} \quad (3)$$

$$FCA = \frac{\text{Sustrato total consumido por repetición a lo largo del proceso}}{\text{Peso final de la biomasa final por repetición}} \quad (4)$$

2.4. Entorno experimental

Los contenedores fueron envases de polietileno oscuro de 500 ml de volumen, sellados con una malla de mosquitero. Estos contenedores se ubicaron en una cámara de cría oscura con un área de 150 cm². La temperatura se controló con un mini calefactor *Handy Heater 400w*, programado para encenderse durante 30 minutos cada 90 minutos. La temperatura y la humedad se registraron utilizando un termohigrómetro con sonda.

2.5. Toma de datos y estadística

Los datos se recopilaban en intervalos semanales y abarcaron variables como la tasa de supervivencia y de pupa, el tiempo requerido para que las larvas se convirtieran en pupas, el factor



Figura 2. Toma de medidas de la longitud de las larvas de *Tenebrio molitor*. Se colocaron las larvas sobre una superficie milimetrada.

de conversión de alimento (*FCA*) y la cantidad de *frass* producido en cada tratamiento. La longitud de las larvas se midió en milímetros, tomando una muestra al azar de entre 5 y 10 larvas por repetición. Las variables de *FCA* y longitud final, por tener un gran número de datos, se promediaron hasta obtener un valor por repetición de cada tratamiento.

En el momento en el cual se tomaron los datos, también se agregó sustrato húmedo en todos los tratamientos. Se buscaron individuos muertos o pupas, a las que se les cambió de contenedor para evitar depredación y/o contaminación.

Los datos se registraron en hojas de cálculo de Excel 365. Para la estadística se consideró un nivel de significancia de $p < 0.05$ y un nivel de confianza de 95%. Se realizaron pruebas de normalidad y se utilizaron estos resultados para determinar la prueba estadística más apropiada. Se aplicaron pruebas estadísticas como U de Mann-Whitney, T de Student, ANOVA o Kruskal-Wallis, junto con pruebas post hoc, según corresponda. Para el análisis se utilizó el software BioEstat (Ayres et al., 2007).

El registro de longitud se realizó en milímetros (Figura 2) y se promedió por repetición cada semana.

Los resultados fueron interpretados con el propósito de comprender la influencia de las distintas dietas en el desarrollo de las larvas y la producción de frass, y así poder establecer la efectividad de los diferentes tratamientos en el contexto de una economía circular.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante un periodo de seis meses, se registraron las variables ambientales en la cámara de cría, con promedio de humedad de $49,27\% \pm 7,8\%$; mientras que la temperatura se promedió en $23,66^\circ\text{C} \pm 9,56$. Según la Plataforma Internacional para alimentos de Insectos (IPIFF, 2022), para *T. molitor* las condiciones ambientales ideales incluyen una humedad relativa del 70% y una temperatura de 25°C y que no superen los 45°C . Para esta investigación, si bien el valor de humedad no alcanza el porcentaje ideal para este parámetro, este valor no influiría en la supervivencia de las larvas. Dado que, a una temperatura cercana a los 25°C , la humedad no influye directamente en la supervivencia de larvas, pupas y adultos de *T. molitor*. En estas condiciones la supervivencia de cada etapa oscila en el 90% (Mirzaeva et al., 2020).

La tasa de supervivencia entre los tres grupos de estudio de *T. molitor*, se evidenció una diferencia significativa ($p=5,0 \times 10^{-4}$). El tratamiento con una dieta totalmente inorgánica presentó un promedio de 26,75%, en comparación con los otros dos tratamientos que alcanzaron valores del 57% y 66% respectivamente para la dieta orgánica y combinada (Figura 3). La tasa de supervivencia es una variable importante en el estudio, debido a que es la variable más evidente para pronosticar y evaluar el sustrato como un elemento viable para el desarrollo de las larvas.

En el trabajo de Yang et al. (2018) en relación con la influencia de una dieta plástica en *T. molitor*: y en otro trabajo con especies de escarabajos como *Zophobas atratus*, se ilustraron tasas de supervivencia entre 75% y 90%. Las diferencias en los porcentajes de supervivencia, entre este y otros trabajos previamente publicados, responden principalmente al periodo de análisis. En esos trabajos se estudió el desarrollo larval durante aproximadamente 30 días (Jiang et al., 2021; Yang et al., 2018) y en etapas larvales más avanzadas. El poco estrés al que las larvas se someten en periodos de investigación cortos, junto con la posibilidad de que las larvas, al no ser jóvenes, acumulen reservas nutricionales y energéticas no limitarían la supervivencia de ellas en los estudios que anteriormente se citó.

Los insectos holometábolos, como los escarabajos, para completar su ciclo de vida, deben pasar por un estado de pupa (Mondragón, 2021). En esta investigación, no se encontró, ni registró la formación de pupas en las repeticiones sometidas a una dieta inorgánica durante el periodo de seis meses. Al comparar los valores de las dietas orgánica y combinada (ver Figura 3), se determinó una diferencia importante ($p=6,0 \times 10^{-4}$) en la tasa de formación de pupas, con una tasa de 34,25% para los individuos alimentados con una dieta orgánica, y de solo del 11% para las alimentadas con una dieta combinada. En un estudio similar realizado por Lou et al. (2021), donde se observó que el grupo alimentado con salvado y plástico, se registraron porcentajes superiores de larvas que llevaron a la etapa de pupa.

El tiempo necesario para que las larvas se convirtieran en pupa se registró, y no se encontraron diferencias significativas entre los promedios de $165,06 \pm 13,76$ y $155 \pm 15,59$ días para los tratamientos de dieta orgánica y dieta combinada, respectivamente (ver Figura 4). En el análisis no se incluyeron valores para la dieta inorgánica, ya que no se formaron pupas en este tratamiento durante el periodo de observación.

La diferencia entre los grupos en la longitud final que alcanzaron las larvas resultó ser significativa (Tabla 1). La longitud promedio inicial para todas las larvas fue de $113 \text{ mm} \pm 2,952$. A medida que avanzaba el tratamiento, se evidenció (Figura 3 y 4) una diferencia importante ($p < 0,01$) entre las dietas orgánicas y combinadas con la dieta inorgánica. Dicha diferencia se puede apreciar en la Tabla 1.

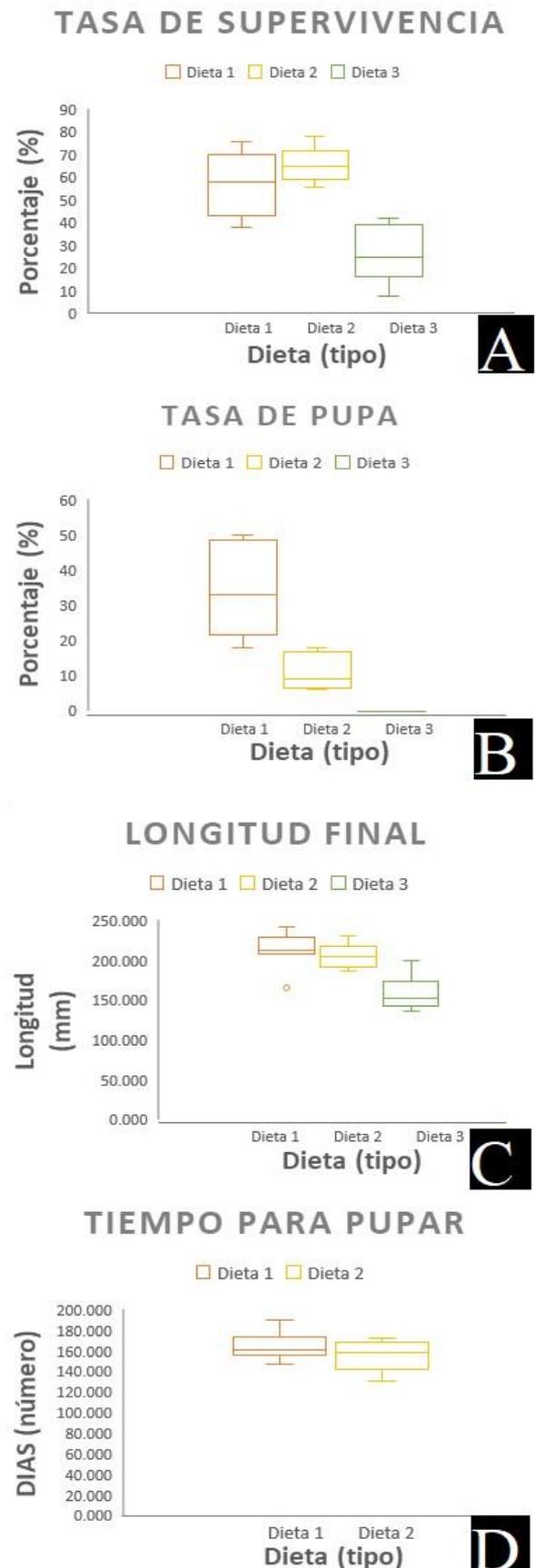


Figura 3. Representaciones gráficas de las variables de desarrollo larval. A: Tasa de supervivencia para los tratamientos. B: Tasa de larvas que llegaron a pupa en cada tratamiento. C: Diferencia de la longitud final en cada tratamiento. D: Tiempo en días que tardaron las larvas en pupar en las dietas.

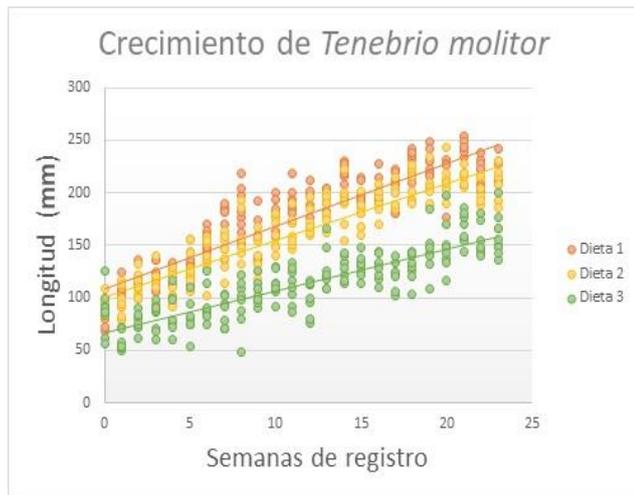


Figura 4. Descripción del crecimiento en centímetros de la muestra de larvas de cada tratamiento a lo largo de seis meses

Las larvas que se desarrollaron en una dieta totalmente plástica no alcanzaron su etapa de pupa. Este hecho es una respuesta a que las larvas no alcanzan su tamaño ideal, debido a su nutrición, para desencadenar la reacción hormonal que les permite pupar (Truman y Riddiford, 2019). Además, las condiciones ambientales en un sustrato solo de plástico pueden ser difíciles de controlar y mantener en el interior de cada una de las repeticiones. Las últimas etapas de larva y pupa son sensibles a la temperatura (Arbab, 2019). Por esta razón, y junto con la desnutrición larval, se comprende por qué el tiempo larval de este tratamiento se prolonga, a tal punto que no se presentaron individuos en etapa de pupa en seis meses de análisis.

Tabla 1. Promedios y desviaciones para las variables de desarrollo larval de cada tratamiento

Dieta	Supervivencia (%)		Pupa (%)	
	valor	p	valor	p
1 Orgánica	57±		34,25±	
	13,69		12,71	
2 Combinada	66±		11±	6,0x10 ^{-4**}
	7,55		5,01	
3 Inorgánica	26,75±	5x10 ^{-4*}		
	12,09			
	Tiempo en pupar (Días)		Longitud final (mm)	
1 Orgánica	165,06±		213±	
	13,76		022	
2 Combinada	155±		205±	
	15,59		015	
3 Inorgánica			159±	< 0.01*
			020	

N/S: Diferencias no significantes con otras dietas. * Diferencia significativa con las otras dos dietas. **Diferencia significativa con la otra dieta

El grupo de larvas sometidas a una dieta completamente inorgánica demostró las tasas más bajas de supervivencia, formación de pupas y crecimiento que se registró. Este hallazgo sugiere que el EPS no proporciona suficientes nutrientes para un desarrollo ideal de las larvas, aunque pueda suplir sus necesidades energéticas (Božek et al., 2017). Además, fue notable que, a pesar de que todas las repeticiones recibieron la misma proporción de alimento fresco y de sustrato de dieta, las larvas en la dieta combinada consumieron

el alimento de manera más voraz. Al contrario, las larvas sometidas a la dieta inorgánica mostraron una tendencia conductual de preferencia por consumir primero el alimento fresco, utilizando el plástico como refugio.

Según Yang et al. (2023), *T. molitor* responde positivamente a una dieta que combine harinas y restos plásticos, lo cual puede atribuirse a la capacidad de las larvas para desarrollar una microbiota intestinal diversa que les permite aprovechar de manera más eficiente los recursos alimenticios disponibles (Lou et al., 2020). En el intestino, se generaría un cambio en el ecosistema bacteriano en respuesta a la inclusión de material inorgánico en la dieta, favoreciendo así a cepas bacterianas menos exigentes y más adaptables a las condiciones ambientales alteradas por el cambio de dieta.

Pero también, una microbiota sometida exclusivamente a una dieta de EPS podría no adaptarse completamente, lo que se suma a la falta de recursos nutritivos en el plástico. De hecho, un estudio concluyó que una dieta plástica disminuye la diversidad del microbioma intestinal en las larvas de otra especie, *Zophobas morio*, y aumenta la proporción de grupos bacterianos patógenos (Sun et al., 2022). La propuesta de que las larvas desarrolladas en una dieta combinada pueden aprovechar mejor los recursos alimenticios se refuerza con el hecho de que no hay diferencias significativas en el crecimiento longitudinal final entre las larvas de la dieta combinada y las larvas de la dieta orgánica.

Actualmente, el cultivo de insectos se enfoca en la generación de proteína, relegando el tratamiento de residuos. Sin embargo, se conoce que una dieta plástica no genera estrés oxidativo en las células de las larvas de coleópteros, e incluso, no afectaría la salud de los individuos, quienes incluso acumularían una mayor proporción de proteína en comparación con una dieta convencional (Zielińska et al., 2021). De confirmarse estas ideas, se amplían significativamente las posibilidades de subproductos y aprovechamiento de recursos en un modelo de economía circular y entomoremediación plástica.

La cantidad de frass recolectado luego del ensayo, fue similar entre la dieta orgánica y la dieta combinada, pero significativamente menor en el caso de la dieta inorgánica (Tabla 2, Figura 5). Esto es una respuesta a que las larvas no tienden a una inclinación natural a alimentarse de plástico.

Los trabajos de Bulak et al. (2018) y Yang et al. (2021) señalan que lo óptimo sería agregar aditivos a los tratamientos plásticos para estimular su consumo o inclinarse hacia dietas combinadas que incluya harinas. Una dieta basada totalmente en plástico no sería ideal para fomentar la entomoremediación de EPS, ya que las larvas no consumen el sustrato de manera voraz y no producen cantidades significativas de frass para revalorizar los residuos. Incluso, teniendo en cuenta que el crecimiento de las larvas es considerablemente más lento, el ciclo de vida se alargaría debido a la falta de nutrientes. Esto resultaría en un sistema ineficiente, con bajas posibilidades de reproducción de los insectos y, por lo tanto, tasas bajas de aumento de biomasa viva para procesar los residuos.

En relación con la cantidad de biomasa aprovechable, en todo tipo de granjas se interpreta la conversión de alimento como la unidad mínima de alimento que requieren los individuos para generar una unidad de cosecha (Cabezas, 2023). Se entiende que, a mayor cantidad de larvas, mayor capacidad de procesamiento de sustrato tiene el sistema.

En este sentido, los mejores valores de *FCA* se obtuvieron de la dieta combinada, que fue significativamente más eficaz que las otras dos dietas (ver Tabla 3). Con este hecho se explica de mejor manera, que las larvas criadas en una dieta combinada tienen mayor capacidad para alimentarse del sustrato, sobrevivir al tratamiento y generar el biofertilizante de interés.

Tabla 2. Datos de la cantidad de Frass recolectado por tratamiento

Dieta	Cantidad de Frass (g.)	
	Valor	<i>p</i>
Orgánica	6,63±0,76	
Combinada	5,11±0,83	
Inorgánica	1,28±0,23	< 0,05*

N/S: Diferencias no significantes con otras dietas. * Diferencia significativa con las otras dos dietas

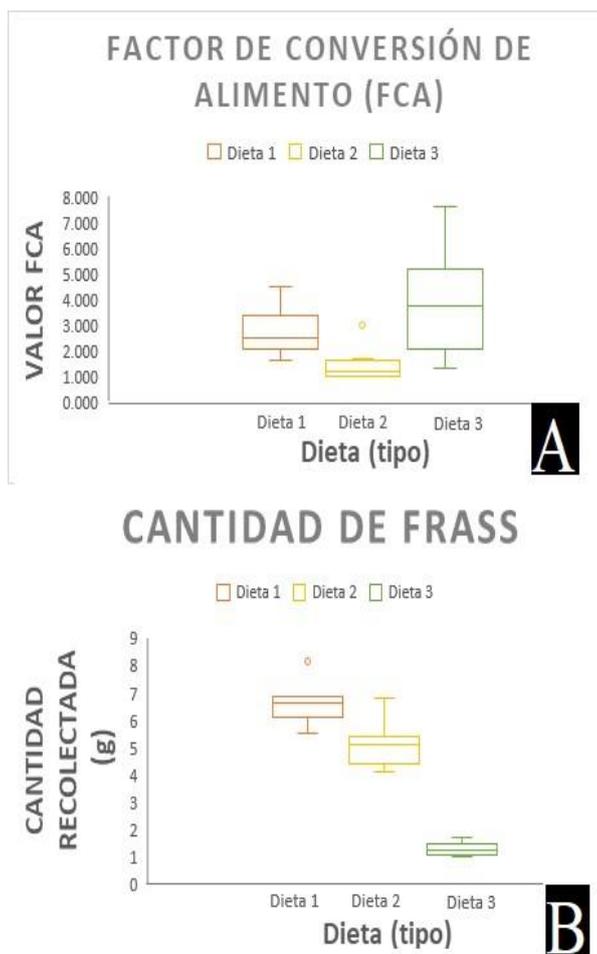


Figura 5. Representaciones gráficas de A: TCA para las tres dietas y, B: Cantidad de Frass recolectada en 6 meses de cada tratamiento.

Tabla 3. Datos del promedio de TCA para las tres dietas

Dieta	Valor de <i>FCA</i>	
	Valor	<i>p</i>
Orgánica	2,25±0,88	
Combinada	1,12±0,35	
Inorgánica	3,87±2,06	< 0,05*

* Diferencia significativa entre la dieta 2 y dieta 3

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de larvas de *T. molitor* se ve afectado negativamente cuando el sustrato de crecimiento se basa únicamente en EPS. En estas condiciones, se observa una disminución en la tasa de supervivencia. Además, es evidente que la inclusión de plástico ya sea como combinación en la dieta o como sustrato único, conlleva una prolongación del tiempo de desarrollo larval. Aunque esta diferencia no resultó entre la dieta combinada con EPS y la dieta completamente orgánica.

Un sustrato totalmente inorgánico no demuestra éxito en el contexto de un sistema de entomoremediación. Esto se evidencia por la cantidad de frass que se extrajo de las repeticiones compuestas por EPS, que tuvo un valor significativamente menor que las otras dietas. Por ello, queda claro que las larvas no tienen un impulso natural para alimentarse exclusivamente de plástico, aun cuando sea el único recurso disponible.

Las dietas combinadas evidencian mejores valores de Factor de Conversión Alimento (*FCA*) y, por lo tanto, mayor cantidad de biomasa capaz de procesar los residuos plásticos sin comprender los niveles de supervivencia. La escasa biomasa generada junto con un procesamiento limitado de EPS por parte de las larvas resulta en una producción de frass poco efectiva, lo que a su vez hace que el sistema carezca de rentabilidad.

Es relevante recalcar que los restos generados de la masticación pueden tener tamaños minúsculos, incluso si no han pasado por el tracto digestivo de las larvas. Por esta razón, es probable que el frass final contenga fragmentos no procesados de alimento, ya sea sustrato orgánico o plástico. Sin embargo, en este estudio no es viable separar y cuantificar la cantidad de microplásticos formado. Por ello, es crucial ampliar la investigación en esta área para determinar la proporción de fragmentos inorgánicos presentes en el biofertilizante. Si existe una proporción significativa o ambientalmente peligrosa, se sugiere considerar vías de tratamiento complementario a para mejorar la calidad del producto final.

Es importante prolongar la investigación en este tema, de esta manera se puede determinar la proporción de fragmentos inorgánicos en el biofertilizante y, de existir un volumen importante del mismo se plantea proponer vías de tratamiento complementario para mejorar la calidad del producto final.

La estandarización de la dieta se plantea como una necesidad importante para futuras investigaciones, dado que las

características del frass pueden variar según la especie criada y la alimentación proporcionada a las larvas.

La interacción con variables ambientales como la temperatura, humedad, fotoperiodo, calidad y disponibilidad de alimento puede influir en el tiempo de vida y en la frecuencia de cambio de estadio de las larvas. Esta manipulación podría ser empleada para controlar el periodo durante el cual las larvas se mantienen en su estado larval y, por ende, mejorar el proceso de entomoremediación.

Es importante abordar de manera adecuada el manejo del frass resultante de este proceso de insecticultura. La gestión eficiente de los residuos se convierte en un factor esencial para fomentar un biocomercio responsable centrado en los insectos y, de esta forma, aprovechar los beneficios socioeconómicos y ambientales que puede brindar esta revalorización novedosa de residuos plásticos.

REFERENCIAS

- An, R., Liu, C., Wang, J., y Jia, P. (2023). Recent Advances in Degradation of Polymer Plastics by Insects Inhabiting Microorganisms. *Polymers*, 15(5), 1307. <https://doi.org/10.3390/polym15051307>
- Arbab, A. (2019). Effect of temperature on pupal development in meal worm *Tenebrio molitor* L. *Indian Journal of Entomology*, 81(4), 640. <https://doi.org/10.5958/0974-8172.2019.00138.X>
- Arriola, E., y Velasquez, F. (2013). *Evaluación técnica de alternativas de reciclaje de poliestireno expandido (EPS)*. [Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador]. Red de repositorios Latinoamericanos repositorio de Obtenido de: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/161014>.
- Ayres, M., Ayres, J., Ayres, D., y Santos, A. (2007). *BioEstat Aplicacoes estatisticas nas áreas das ciencias biológicas and medical (5.0)*.
- Bataineh, K. M. (2020). Life-Cycle Assessment of Recycling Postconsumer High-Density Polyethylene and Polyethylene Terephthalate. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2020/8905431>
- Blakstad, J. (2021). *The utilization of frass from the yellow mealworm (Tenebrio molitor) as a plant fertilizer and immune stimulant*. [Tesis de Maestría, Norwegian University of Science and Technology]. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2782494?locale-attribute=en>
- Božek, M., Hanus-Lorenz, B., y Rybak, J. (2017). The studies on waste biodegradation by *Tenebrio molitor*. *E3S Web of Conferences*, 17, 00011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171700011>
- Brandon, A., Gao, S., Tian, R., Ning, D., Yang, S., Zhou, J., Wu, W., y Criddle, C. (2018). Biodegradation of Polyethylene and Plastic Mixtures in Mealworms (Larvae of *Tenebrio molitor*) and Effects on the Gut Microbiome. *Environmental Science & Technology*, 52(11), 6526–6533. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02301>
- Bulak, P., Polakowski, C., Nowak, K., Waško, A., Wiącek, D., & Bieganski, A. (2018). *Hermetia illucens* as a new and promising species for use in entomoremediation. *Science of The Total Environment*, 633, 912–919. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.252>
- Cabezas, G. (2023). *Suplementación con microorganismos eficientes sobre algunos parámetros productivos en pollos cobb 500*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac]. Repositorio UNAMBA. <https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1251>
- Cella, R., Mumbach, G., Andrade, K., Oliveira, P., Marangoni, C., Bolzan, A., Bernard, S., y Machado, R. (2018). Polystyrene recycling processes by dissolution in ethyl acetate. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(18). <https://doi.org/10.1002/app.46208>
- Chen, Y., Awasthi, A. K., Wei, F., Tan, Q., y Li, J. (2021). Single-use plastics: Production, usage, disposal, and adverse impacts. In *Science of the Total Environment* (Vol. 752). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141772>
- Gan, S., Phua, S., Yeo, J., Heng, Z., y Xing, Z. (2021). Method for Zero-Waste Circular Economy Using Worms for Plastic Agriculture: Augmenting Polystyrene Consumption and Plant Growth. *Methods and Protocols*, 4(2), 43. <https://doi.org/10.3390/mps4020043>
- Gärtling, D., Kirchner, S., y Schulz, H. (2020). Assessment of the N- and P-Fertilization Effect of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) By-Products on Maize. *Journal of Insect Science*, 20(5). <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieaa089>
- Grau, T., Vilcinkas, A., y Joop, G. (2017). Sustainable farming of the mealworm *Tenebrio molitor* for the production of food and feed. *Zeitschrift Für Naturforschung C*, 72(9–10), 337–349. <https://doi.org/10.1515/znc-2017-0033>
- Haque, Md. S. (2019). Sustainable use of plastic brick from waste PET plastic bottle as building block in Rohingya refugee camp: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(36), 36163–36183. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06843-y>
- IPIFF: Plataforma Internacional de Alimentos de Insecto. (2022). *Guide on Good Hygiene Practices. Chapter 1-*

- Food and feed safety management systems: general principles and EU requirements.* <https://ipiff.org/wp-content/uploads/2019/12/IPIFF-Guide-on-Good-Hygiene-Practices.pdf>(Julio, 2023)
- Jiang, S., Su, T., Zhao, J., y Wang, Z. (2021). Biodegradation of Polystyrene by *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella*, and *Zophobas atratus* Larvae and Comparison of Their Degradation Effects. *Polymers*, 13(20), 3539. <https://doi.org/10.3390/polym13203539>
- Lebreton, L., y Andrady, A. (2019). Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, 5(1). <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>
- Lou, Y., Ekaterina, P., Yang, S., Lu, B., Liu, B., Ren, N., Corvini, P., y Xing, D. (2020). Biodegradation of Polyethylene and Polystyrene by Greater Wax Moth Larvae (*Galleria mellonella* L.) and the Effect of Co-diet Supplementation on the Core Gut Microbiome. *Environmental Science & Technology*, 54(5), 2821–2831. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07044>
- Lou, Y., Li, Y., Lu, B., Liu, Q., Yang, S., Liu, B., Ren, N., Wu, W., y Xing, D. (2021). Response of the yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) gut microbiome to diet shifts during polystyrene and polyethylene biodegradation. *Journal of Hazardous Materials*, (416). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126222>
- Mirzaeva, D. A., Khujamshukurov, N. A., Zokirov, B., Soxibov, B. O., y Kuchkarova, D. (2020). Influence of Temperature and Humidity on the Development of *Tenebrio molitor* L. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(5), 3544–3559. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.905.422>
- Mondragón, I. (2021). Dimorfismo sexual de *Zophobas morio* (Fabricius, 1776) (Coleoptera, Tenebrionidae) en las etapas de pupa y de adulto. *Ingeniería y Región*, 25, 22–31. <https://doi.org/10.25054/22161325.2703>
- Official Journal of the European Union (2021). *Amending certain Annexes to Regulation (EU) No 142/2011 as regards the requirements for placing on the market of certain insect products and the adaptation of a containment method* (L. No. 142/2011). <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC109216/>
- Oonincx, D., van Broekhoven, S., van Huis, A., y van Loon, J. J. A. (2019). Correction: Feed Conversion, Survival and Development, and Composition of Four Insect Species on Diets Composed of Food By-Products. *PLOS ONE*, 14(10), artículo e0222043. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222043>
- Patrício, A., Prata, J., Walker, T., Campos, D., Duarte, A., Soares, A., Barcelò, D., y Rocha-Santos, T. (2020). Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic: Policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment. *Science of The Total Environment*, 742, 140565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140565>
- Poveda, J. (2021). Insect frass in the development of sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00656-x>
- Ramli, N. H., Mustapa, S., y Abdul, M. (2019). Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 47529. <https://doi.org/10.1002/app.47529>
- Solíz, M. (2015). Ecología política y geografía crítica de la basura en el Ecuador. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 17. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.17.2015.1259>
- Sun, J., Prabhu, A., Aroney, S., y Rinke, C. (2022). Insights into plastic biodegradation: community composition and functional capabilities of the superworm (*Zophobas morio*) microbiome in styrofoam feeding trials. *Microbial Genomics*, 8(6). <https://doi.org/10.1099/mgen.0.000842>
- Tan, K., Mohd, N., Mohd A., Razak, A., y Kamarudin, K. (2021). Isolation and identification of polystyrene degrading bacteria from *Zophobas morio*'s gut. *Walailak Journal of Science and Technology*, 18(8). <https://doi.org/10.48048/wjst.2021.9118>
- Truman, J., y Riddiford, L. (2019). The evolution of insect metamorphosis: a developmental and endocrine view. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 374(1783), 20190070. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0070>
- van Huis, A., van Itterbeeck, J., Klunder, H., Mertens, E., Halloran, A., Muir, G., y Vantomme, P. (2013). *Edible insects: future prospects for food and feed security* Roma, Italia. FAO. <https://www.fao.org/3/i3253e/i3253e.pdf>
- Yang, L., Gao, J., Liu, Y., Zhuang, G., Peng, X., Wu, W., y Zhuang, X. (2021). 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*, 262, 127818. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127818>
- Yang, S., Brandon, A., Andrew Flanagan, J., Yang, J., Ning, D., Cai, S., Fan, H., Wang, Z., Ren, J., Benbow, E., Ren, N., Waymouth, R., Zhou, J., Criddle, C., y Wu, W. (2018). 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*, 191, 979–989. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.117>

Yang, X., Wen, P., Yang, Y., Jia, P., Li, W., y Pei, D. (2023). Plastic biodegradation by in vitro environmental microorganisms and in vivo gut microorganisms of insects. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1001750>

Yang, Y., Yang, J., Wu, W., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., Yang, R., y Jiang, L. (2015). Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests. *Environmental Science and Technology*, 49(20), 12080–12086. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02661>

Zielińska, E., Zieliński, D., Jakubczyk, A., Karaś, M., Pankiewicz, U., Flasz, B., Dziewięcka, M., y Lewicki, S. (2021). The impact of polystyrene consumption by edible insects *Tenebrio molitor* and *Zophobas morio* on their nutritional value, cytotoxicity, and oxidative stress parameters. *Food Chemistry*, 345, 128846. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128846>

BIOGRAFÍA



Daniela, Bastidas Proaño, es Licenciada en Ciencias Biológicas y Ambientales, graduada de la Universidad Central del Ecuador en 2020. Obtuvo su Maestría en Gestión Ambiental en la Universidad Internacional Iberoamericana de México en 2023. Durante su carrera,

completó pasantías en INABIO y ha acumulado experiencia en laboratorios especializados en entomología, biología molecular y de reproducción asistida. Además de ser coautora de artículos científicos de endocrinología. Actualmente su principal enfoque es la gestión de residuos a través del enfoque entomológico y la promoción de la economía circular mediante la insecticultura

