

Recibido 26 de junio de 2025. Aceptado 26 de noviembre de 2025. Publicado 22 de diciembre de 2025.

ISSN: 2448-7775

Efecto de la fermentación de residuos agroindustriales sobre el crecimiento y el potencial metanogénico de subproductos (*frass*) del cultivo de larvas de *Hermetia illucens*

ANGELA JOANNE VILLELA-ROSAS^{1£}, VERÓNICA VANESSA HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ^{1£}, ERICK JOSUE NAVARRO-BARRÓN^{1,2,3}, BRUNO GÓMEZ-GIL³, MIGUEL BETANCOURT-LOZANO⁴, KARLA DENISSE LUNA-AVELAR^{2,4*}.

¹Departamento de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Occidente. Mazatlán, Sinaloa, México.

²Estancias posdoctorales por México, SECIHTI. Ciudad de México, México.

³Laboratorio de Genómica Microbiana, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Unidad Mazatlán. Mazatlán, Sinaloa, México.

⁴Laboratorio de Ecotoxicología y Bioprocesos, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Unidad Mazatlán. Mazatlán, Sinaloa, México.

*Autor de correspondencia: karla.luna@ciad.mx

£ Estos autores tuvieron el mismo nivel de participación en el trabajo

RESUMEN La inadecuada gestión de residuos agroindustriales representa un desafío ambiental y económico. Por lo que, el uso integral del plátano para cultivar larvas de *Hermetia illucens* surge como alternativa innovadora, ya que permite la producción de biomasa proteica y subproductos útiles como el *frass*, adecuado para generar energía renovable como el biogás. Por lo anterior, se evaluó el efecto de la fermentación de residuos de plátano como dieta experimental sobre el crecimiento y composición de larvas, y sobre el potencial metanogénico del *frass*, subproducto del cultivo. Obteniendo resultados de peso (265.8 ± 65.8 mg) y contenido proteico ($37.5 \pm 0.1\%$) más altos en larvas cultivadas con la dieta fermentada, que sin fermentar. Asimismo, se obtuvo una mayor producción de CH_4 (284.3 ± 29.9 mL $\text{CH}_4 \cdot \text{gSV}^{-1}$) al emplear el *frass* pre-tratado. Esto sugiere una estrategia para valorizar residuos agroindustriales mediante su bioconversión en bioproductos y biocombustibles, bajo un enfoque de economía circular.

PALABRAS CLAVE—Residuos de plátano, fermentación, larvas de mosca soldado negro, *frass*, potencial metanogénico.

I. INTRODUCCIÓN

La gestión ineficiente de los desechos agroindustriales representa una problemática ambiental y económica de gran relevancia [1]. Puesto que, la acumulación de residuos provenientes de la agricultura, la pesca y la industria alimentaria contribuye significativamente a la contaminación del suelo, el agua y el aire, además de generar pérdidas económicas por el desaprovechamiento de recursos potencialmente útiles [2].

Según reportes de la SADER, durante el 2024, se produjeron 2,642 toneladas de productos agrícolas. Del total reportado, los estados de Chiapas, Tabasco y Veracruz se han posicionado como los principales productores de plátano, al cultivar casi más de la mitad de la producción nacional del fruto. Es importante resaltar que, de la producción de plátano reportada, en México, se desperdicia alrededor del 53.76% [3, 4]. Lo anterior se debe al descarte por incumplimiento de los estándares de calidad requeridos para su

comercialización. Asimismo, se genera una cantidad considerable de residuos de plátano, principalmente compuestos por frutos completos y cáscaras provenientes del consumo en restaurantes, hogares y centros educativos [5].

En este sentido, el uso de residuos agroalimentarios, como el plátano, en el cultivo de larvas de *Hermetia illucens*, conocidas comúnmente como mosca soldado negra (MSN), representa una estrategia innovadora para la gestión de desechos y la generación de biomasa de alto valor proteico [6]. Además, se ha demostrado que la fermentación de estos residuos con *Saccharomyces cerevisiae*, no solo acelera la descomposición de la materia orgánica, sino que también mejora la biodisponibilidad de los nutrientes, lo que favorece el crecimiento de las larvas MSN y optimiza la producción de biomasa [5]. Por lo que, emplear plátano fermentado como dieta para cultivar larvas MSN podría incrementar, aún más, su contenido de proteínas y grasas. Esto ofrecería una alternativa económica y sostenible para las industrias ganadera y acuícola en la elaboración de piensos [7,8].

Por otro lado, aprovechar los subproductos de dicho bioproceso, tales como el *frass*, compuesto de exoesqueletos, excremento y residuos del sustrato, como alimento durante el cultivo de MSN, aporta un valor ambiental significativo. Puesto que este residuo puede utilizarse como biofertilizante, enriqueciendo los suelos agrícolas, o como sustrato para la producción de biogás, impulsando así, el uso de energías renovables. De esta manera, el proyecto no solo comprende la gestión eficiente de desechos agroindustriales, sino que también fomenta una producción agropecuaria más sostenible y promueve la adopción de energías verdes, en línea con los principios de la economía circular [9].

Durante los últimos años, se ha reportado con mayor frecuencia el uso de residuos orgánicos como fuentes de energía renovable. Según un estudio realizado por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía (CONUEE), México cuenta con una gran variedad de residuos biomásicos, entre ellos, los agroalimentarios pueden contribuir como fuente de materia prima disponible para la producción de energía renovable, en forma de biogás, mediante la digestión anaerobia (DA) [10]. Adicionalmente, en los últimos años, las larvas MSN han demostrado rendimientos prometedores en la remoción de materia orgánica y en la capacidad de bioacumulación de compuestos bioactivos de interés comercial, que proporcionan beneficios ambientales en el ciclo de nutrientes del suelo y de las plantas [11].

Con base en lo anterior, se presenta esta investigación como una alternativa para valorizar residuos agroindustriales, a partir de la aplicación de bioprocesos acoplados: fermentación, degradación con MSN y digestión anaeróbica, con la finalidad de potenciar la generación de bioproductos y biocombustibles, en beneficio del medio ambiente. Para ello, se evaluó el efecto de la fermentación de residuos de plátano con *Saccharomyces cerevisiae* sobre la producción y composición de biomasa larval, y sobre el potencial metanogénico de subproductos (*frass*) del cultivo de MSN.

II. DESARROLLO

A. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Diseño de experimento de dietas y cría de larvas.

Se recibió una donación de larvas MSN por parte de la productora de alimentos CICLICA. Posteriormente, las larvas fueron criadas en el CIAD Mazatlán bajo condiciones controladas de temperatura de incubación a 27.5°C, humedad relativa del 60 - 70%, y alojadas en charolas de cierre hermético con sistema de ventilación, garantizando así un ambiente óptimo para su desarrollo.

Se evaluaron dos tratamientos experimentales utilizando residuos de pulpa de plátano y levaduras comerciales de

Saccharomyces cerevisiae. El primer tratamiento (T100) consistió en pulpa de plátano sin fermentar, mientras que el segundo (T100F) empleó pulpa de plátano fermentada con *Saccharomyces cerevisiae*. Para cada tratamiento se establecieron tres réplicas, utilizando 300 larvas por unidad experimental. El peso promedio inicial de las larvas fue de 15 - 20 mg, las cuales fueron cultivadas bajo las condiciones anteriormente descritas a los 6 días post-eclosión (DPE).

A cada unidad experimental se le proporcionaron 250 g de la dieta establecida, la cual fue suministrada tres veces durante un periodo experimental de 15 días. La recolección de datos biométricos se realizó en los días 6, 8, 10, 12, 14 y 16, evaluando de manera aleatoria el 10 % de la población de larvas MSN en cada réplica. Luego, se registró su peso en miligramos, con el objetivo de analizar el crecimiento de las larvas entre los tratamientos.

2. Determinación de la composición proximal de las larvas MSN

Los análisis proximales se realizaron para determinar la composición básica y el contenido nutricional de las larvas MSN, utilizando muestras por triplicado para cada dieta experimental, según la metodología [12].

Para la determinación de materia seca y humedad, se empleó el método de secado en horno. Este consistió en pesar 5 g de larvas previamente maceradas en charolas de aluminio, las cuales fueron colocadas en un horno a 105 °C durante 5 horas. La humedad se calculó por diferencia de peso entre la muestra húmeda y la seca Ec. (1). Donde: a = peso del crisol [g], b = peso de la muestra húmeda [g], c = peso del crisol + muestra seca [g].

$$\% \text{Humedad} = \frac{(a-b)}{c} \times 100 \quad (1)$$

Para la determinación del contenido de ceniza, se utilizaron crisoles de porcelana, en los cuales se colocaron 2.5 g de la muestra seca. Posteriormente, los crisoles se llevaron a la mufla para su calcinación a 550 °C durante 6.5 h. El cálculo del porcentaje de ceniza se realizó con base en la Ec. (2), donde: a = peso del crisol con la muestra calcinada [g], b = peso del crisol vacío [g] y c = peso de la muestra seca [g].

$$\% \text{Ceniza} = \frac{(a-b)}{c} \times 100 \quad (2)$$

Adicionalmente, se realizó la determinación del contenido de grasa (lípidos) presente en las muestras mediante el método de Soxhlet, Ec. (3). Para ello, se colocaron 0.5 g de muestra de larvas en cartuchos de papel filtro Whatman. Posteriormente, se utilizaron 90 mL de éter de petróleo como solvente, vertidos en vasos de aluminio previamente pesados. Donde: a = peso constante del vaso [g],

b = peso del vaso con grasa (después de la extracción) [g], y
 c = peso de la muestra [g].

$$\% \text{ Lípidos} = \frac{(a-b)}{c} \times 100 \quad (3)$$

Para la determinación de proteína mediante el método micro-Kjeldahl, utilizado para cuantificar el nitrógeno en muestras, el procedimiento se dividió en tres etapas, considerando las muestras por triplicado:

- Digestión: se mezclaron 0.1–0.5 g de muestra con 1 g de catalizador (K_2SO_4 y $CuSO_4$ o selenio) y 10 mL de H_2SO_4 concentrado hasta clarificación completa
- Destilación: se adicionaron 10 mL de NaOH para liberar NH_3 , el cual se destiló y capturó en ácido bórico al 3% con indicador
- Titulación: se valoró con HCl o H_2SO_4 estándar hasta el viraje del indicador (de azul verdoso a rosado) [12].

Los valores de proteína se obtuvieron mediante la Ec. (4):

$$\% \text{ proteína} = (\text{Gasto } HCl_{\text{muestra}} - \text{Gasto } HCl_{\text{blanco}}) * N * 14.007 * 100 * 6.25 \quad (4)$$

3. Evaluación de la producción de biogás

a. Obtención de sustratos e inóculo.

Los sustratos consistieron en el *frass* colectado de ambos cultivos de larvas MSN, es decir, *frass* colectado de larvas cultivadas con dieta de plátano no fermentada (*f*-T100) y *frass* colectado de larvas cultivadas con dieta de plátano fermentada con *Saccharomyces cerevisiae* (*f*-T100F). Mientras que, el inóculo consistió en lodo activado colectado de un digestor anaeróbico que procesa estiércol de ganado vacuno, de la empresa de biofertilizantes BeGaia®, ubicada en Escamillas, Sinaloa, México.

b. Caracterización de sustratos e inóculo.

Previo al experimento de DA, se realizó la caracterización, tanto de los sustratos como del inóculo, mediante la determinación de sólidos totales (ST), % humedad, sólidos volátiles (SV) y cenizas o sólidos fijos (SF), siguiendo cada una de las metodologías estandarizadas [12].

Para la determinación de ST, los crisoles fueron sometidos a 105 °C durante 24 h en el horno hasta alcanzar peso constante, posteriormente se dejaron enfriar en un desecador y se registró su peso (W_{crisol}). Luego, se añadieron 1.5 g de cada sustrato y 10 g de muestra correspondiente al inóculo (INO), y se registraron sus pesos (W_{muestra}), posteriormente las muestras se secaron a 105 °C por 24 h, pasado ese periodo, se registró el peso seco (W_{total}). Para determinar el porcentaje de ST se utilizó la Ec. (5).

$$\%ST = \frac{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}}{W_{\text{muestra}} - W_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (5)$$

El contenido de humedad (%) se calculó con la diferencia de porcentaje de los ST, empleando la Ec. (6)

$$\%H = 100\% - \%ST \quad (6)$$

Para la determinación de SV y SF, los crisoles con las muestras secas se calcinaron en una mufla a 550°C durante 2 h, posteriormente fueron pesados y registrados. Los resultados de SV y SF se calcularon con las ecuaciones: Ec. (7) y Ec. (8). Todas las pruebas se realizaron por triplicado y los resultados se presentaron como porcentaje promedio y su desviación estándar.

$$\%SV = \frac{W_{\text{total}} - W_{\text{volátil}}}{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (7)$$

$$\%SF = \frac{W_{\text{volátil}} - W_{\text{crisol}}}{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (8)$$

c. Evaluación del potencial metanogénico

La evaluación del potencial metanogénico de cada *frass* recolectado del cultivo de larvas se realizó por triplicado. Para ello, se utilizaron reactores de 120 mL con un volumen de trabajo de 70 mL, sellados herméticamente y equipados con un septo para punción y medición directa del volumen de biogás producido. La producción de biogás también se realizó mediante un manómetro SMC ISE20-P que mide la presión dentro del biorreactor (MPa). Paralelamente, se empleó eudiometría con una solución de hidróxido de sodio 1 N para medir el desplazamiento del gas, es decir, la fracción de gas metano (CH_4) producido.

Paralelamente, se monitorearon controles negativos que contenían solo inóculo para la corrección del metano residual, así como controles positivos adicionados con celulosa. Los reactores fueron colocados en una incubadora con agitación de 150 rpm a una temperatura de 37 ± 1 °C, durante 47 días.

4. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos aplicados a los tratamientos T100 y T100F se realizaron en el software RStudio®, con la prueba ANOVA test ($p \geq 0.05$). Las variables respuesta de los análisis proximales fueron: el peso [g] de las larvas y contenido de lípidos y proteínas (%); y del PM: la producción de metano ($mL CH_4 \cdot gSV^{-1}$). Adicionalmente, se realizó el ajuste al modelo de Gompertz modificado con los resultados experimentales de la producción acumulada de CH_4 en el software SigmaPlot 12.5®.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

1. CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LARVAS CON LAS DIETAS T100 Y T100F

El peso larval aumentó a medida que avanzaron los DPE. El tratamiento T100F presentó un peso significativamente mayor en varios puntos del desarrollo, especialmente a los 12 y 14 DPE (Fig. 1). Se obtuvo que, el crecimiento en el T100 fue de 148.72 ± 70.59 mg, mientras que el peso promedio en T100F fue de 265.79 ± 65.82 mg, además, se realizó un ANOVA de un factor para evaluar el efecto de los tratamientos sobre el peso promedio de las larvas. Los resultados indicaron diferencias altamente significativas entre tratamientos ($p = 1.26 \times 10^{-21}$), lo que sugiere que la dieta tuvo un efecto considerable en el crecimiento larval.

Los resultados mostraron un incremento progresivo en el peso larval a medida que pasaron los DPE, lo cual es consistente con el patrón natural de crecimiento de larvas MSN [10]. Además, se observaron diferencias significativas entre tratamientos en varios puntos del desarrollo, destacando que el tratamiento T100F promovió un mayor peso promedio en comparación con T100, especialmente en los 12 y 14 DPE [13]. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que reportan mejoras en el rendimiento larval cuando se incorporan levaduras fermentadas o aditivos microbianos en la dieta. Esto sugiere que la fermentación de la dieta T100F pudo haber mejorado la disponibilidad de nutrientes o la palatabilidad del sustrato, favoreciendo la eficiencia alimentaria y la acumulación de biomasa larval [13, 14].

2. COMPOSICIÓN PROXIMAL DE LARVAS MSN

Los resultados de la composición proximal (Tabla I) presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos en los contenidos de proteína y lípidos. El tratamiento T100F presentó un mayor contenido de proteína (37.50 ± 0.10^b %) comparado con T100 (32.69 ± 0.10^a %). Por el contrario, el contenido de lípidos fue significativamente mayor en T100 (51.36 ± 0.37^b %), respecto a T100F (43.62 ± 0.83^a %).

Estos resultados se pueden contrastar con lo reportado por Holeh y colaboradores [15], quienes obtuvieron 51.52 ± 0.01 % de proteína al alimentar larvas con una mezcla de residuos de plátano y papa, siendo un valor mayor que el del presente estudio en ambos tratamientos. Respecto a la fracción lipídica, los valores de ambos tratamientos obtenidos en esta investigación fueron mayores a lo reportado por Nyakeri y colaboradores (27.2%), quienes emplearon residuos orgánicos de frutas, para alimentar a las larvas MSN [16]. Preliminarmente, la biomasa larval obtenida de T100F presentó un mayor contenido de proteína, ELN y humedad, mientras que T100 favoreció la acumulación de lípidos. Lo anterior sugiere que existen diferencias en la disponibilidad

energética y de nutrientes de la dieta [17]. Estas variaciones demuestran el efecto significativo que presenta el tipo de dieta sobre la composición nutricional de MSN [18]. Por su parte, el contenido de cenizas fue similar en ambos tratamientos. Estos resultados destacan el potencial de MSN como ingrediente proteico alternativo en alimentación animal, cuya composición puede modularse mediante estrategias de alimentación [17, 18].

3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUSTRATOS E INÓCULO

En la Tabla II, se muestra el contenido de ST y SV de los sustratos analizados; se puede observar que ambas muestras presentan altos valores de SV, relevantes para el proceso de DA, dado que dan un indicio de la cantidad de materia orgánica presente en los sustratos y que posiblemente se transforme en biogás.

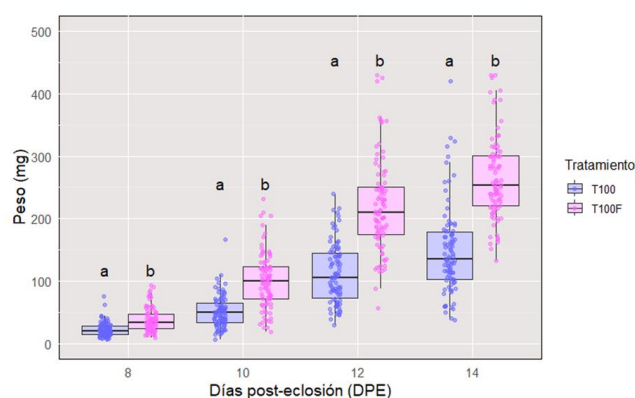


Fig. 1. Peso promedio (mg) de larvas MSN alimentadas con los tratamientos T100 y T100F a distintos DPE. Las cajas muestran el promedio, los cuartiles y la dispersión de los datos; los puntos representan los valores individuales. Letras distintas (a, b) indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en cada tiempo ($p < 0.05$; ANOVA post hoc Tukey).

TABLA I. COMPOSICIÓN PROXIMAL DE LARVAS MSN ALIMENTADAS CON DOS TRATAMIENTOS DIETÉTICOS (T100 Y T100F).

Parámetros	T100	T100F
Humedad	72.43 ± 2.81	76.59 ± 4.60
Proteína	32.69 ± 0.10^a	37.50 ± 0.10^b
Lípidos	51.36 ± 0.37^b	43.62 ± 0.83^a
ELN	12.02 ± 0.61	15.15 ± 0.53
Ceniza	3.43 ± 0.25	3.37 ± 0.26

Los valores representan el promedio de las tres réplicas $\pm$ desviación estándar. T100: dieta compuesta de residuos de plátano; T100F: dieta compuesta de residuos de plátano fermentados ELN: Extracto Libre de Nitrógeno. ANOVA Post Hoc Tukey en Proteína: $p = 4.72 \times 10^{-7}$; ANOVA Post Hoc Tukey en Lípidos: $p = 9.76 \times 10^{-5}$.

TABLA II. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUSTRATOS E INÓCULO EMPLEADO EN DA.

Sustrato	%ST	%H	%SV	%SF
f-T100	17.35 ± 0.77	5.25 ± 0.47	94.39 ± 0.24	5.61 ± 0.24
f-T100F	21.14 ± 0.40	78.86 ± 0.40	94.75 ± 0.47	82.65 ± 0.77
INO	7.47 ± 0.90	92.53 ± 0.90	58.68 ± 0.43	41.35 ± 0.43

Los valores representan el promedio de las tres réplicas $\pm$ desviación estándar. ST: sólidos totales, SV: sólidos volátiles, SF: sólidos fijos, H: humedad.

De acuerdo con varios estudios, un contenido de SV superior al 50% es viable para la digestión anaerobia para la producción de metano [19].

4. POTENCIAL METANOGENICO

La producción de biogás se detectó desde el primer día de experimentación entre ambos tratamientos. En la Fig. 2, se puede observar la producción acumulada de CH₄ de cada tratamiento, donde la tendencia fue similar durante los primeros 7 días. A partir de entonces, se puede observar un muy ligero aumento en la producción de CH₄ del tratamiento *f*-T100F, pero fue hasta el día 23 que el aumento observado fue significativo, manteniendo una fase de latencia muy larga, de aproximadamente 23 días.

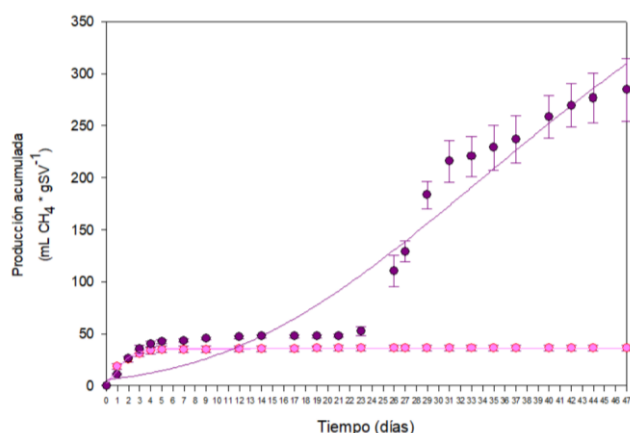


Fig. 2. Producción de CH₄ acumulada de *f*-T100 (●) y *f*-T100F (●). La línea sólida representa el ajuste al modelo de Gompertz modificado.

Asimismo, se puede observar en la Tabla III los valores de la producción acumulada de CH₄ experimental de cada uno de los tratamientos. En dicha tabla, se muestra que en el tratamiento de *f*-T100F presentó una mayor producción de CH₄, a pesar de la baja producción registrada durante los primeros días (14-18), mientras en el tratamiento de *f*-T100 se mantuvo con menor producción.

TABLA III. PRODUCCIONES ACUMULADAS Y PORCENTAJE DE METANO CONTENIDO EN EL BIOGÁS GENERADO.

Sustrato	Producción acumulada experimental (mL CH ₄ • g SV ⁻¹)	Producción acumulada estimada (mL CH ₄ • g SV ⁻¹)	% CH ₄
<i>f</i> -T100	36.09 ± 2.47 ^b	35.67	54.12 ± 0.80
<i>f</i> -T100F	284.34 ± 29.89 ^a	539.66	59.33 ± 1.50

Los valores representan el promedio de 3 réplicas ± desviación estándar. Letras distintas (a, b) indican diferencias estadísticamente significativas (p < 0.05, n=3; ANOVA post hoc Tukey).

En cuanto al CH₄ generado, el tratamiento *f*-T100 presentó un 54 % de CH₄, mientras que *f*-T100F obtuvo un valor de 59 %. Estos valores indican que ambos tratamientos de *frass* pueden ser considerados como una opción viable

para generar biogás apto para ser empleado como combustible, ya que son superiores a lo reportado en la literatura > 45 % CH₄ [18]. Respecto a los valores de CH₄ reportados en la literatura, se han realizado estudios donde emplean residuos orgánicos de tomate como sustrato para la producción de biogás como fuente de energía renovable, en los cuales han reportado valores cercanos a los del presente estudio, de 46.16% en el biogás producido [19]. Por otra parte, un estudio realizado por Łochyńska y Frankowski en el año 2018, reportó una producción de biogás con 50.4% de CH₄ usando excremento de gusanos de seda previamente fermentado [20].

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, se puede observar que el tratamiento de *frass* fermentado por *Saccharomyces cerevisiae* presentó la mayor producción de CH₄ (59 %). Lo que sugiere que aplicar pretratamientos biológicos con esta levadura, podría generar un aumento en el potencial metanogénico del *frass* o del sustrato seleccionado.

Por otro lado, se ha encontrado que los residuos de plátano poseen valores de humedad mayores al 80 % óptimos para la producción de biogás por medio de la digestión anaerobia [21]. Sin embargo, otros estudios han reportado que los residuos orgánicos con una humedad superior al 50 % pueden ser un problema para la producción de biogás por otros métodos físicoquímicos, debido a la poca materia prima disponible. Por lo tanto, el implementar varios pretratamientos a este tipo de sustratos podría optimizar la producción de biogás y la generación de metano [22].

No obstante, se ha reportado que *Saccharomyces cerevisiae* es una levadura que puede usarse como un iniciador en la producción de biogás, al propiciar la degradación de la fibra y estimular el crecimiento de bacterias y hongos celulolíticos, así como modificar el pH en los digestores mediante la producción de ácidos orgánicos, compuestos intermediarios para la producción de CH₄ por medio de arqueas metanogénicas [23].

Considerando que el tratamiento *f*-T100F superó el valor de la producción de biogás del tratamiento *f*-T100, esto podría indicar que *Saccharomyces cerevisiae* cumple un papel fundamental en la descomposición de residuos orgánicos, facilitando, en primera instancia, la degradación de la dieta por las larvas MSN, y en segunda, aumentando la producción de biogás. Sin embargo, cabe la posibilidad de que el proceso de degradación de residuos de plátano sin fermentar, empleando larvas MSN podría conservar o generar ciertos compuestos que inhiben el proceso anaeróbico, como en el caso de este estudio, observado en el tratamiento *f*-T100.

5. ACOPLAMIENTO DE BIOPROCESOS: FERMENTACIÓN-MSN-DA

En la Fig. 3 se muestra una comparación de los diferentes escenarios propuestos para la generación de bioproductos y biocombustibles con valor comercial, obtenidos a partir de la valorización de residuos agroalimentarios al acoplar bioprocesos, bajo un enfoque de economía circular.

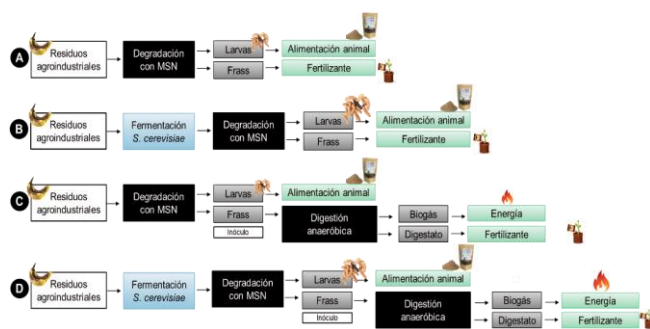


Fig. 3. Esquema de posibles estrategias de tratamientos para residuos de alimentos.

El escenario ideal (D) podría dar lugar a la generación de tres bioproductos: primero, i) el cultivo de larvas MSN permitirá el crecimiento de éstas para producir biomasa larval, que, a su vez, puede ser potenciado al fermentar la dieta suministrada; asimismo, permitiría la generación de *frass*, subproducto del cultivo que puede emplearse como sustrato en la DA, para obtener a su vez, (ii) biogás y (iii) digestato, éste último es un residuo de la DA que puede ser usado como fertilizante líquido. La recomendación es aprovechar la biomasa larval para elaborar harina rica en nutrientes para alimentación animal, emplear el biogás como combustible o energía renovable, y usar el digestato como fertilizante líquido o biomejorador de suelos, tomando ventaja de su microbiología. Finalmente, esta investigación tiene potencial como precedente a futuros trabajos que promuevan la fermentación de residuos agroalimentarios como exploración de biomásas para la generación de energías renovables, así como el uso de pre-tratamientos que aumenten la producción de biogás, bajo un enfoque de cero residuos.

IV. CONCLUSIONES

El aumento de peso larval en MSN progresó a medida que avanzaron los DPE, registrándose la mayor diferencia ($p < 0.05$) entre tratamientos en los DPE 12 y 14. Al finalizar el cultivo, las larvas alcanzaron pesos de 148.72 ± 70.59 mg y 265.79 ± 65.82 mg en los tratamientos T100 y T100F, respectivamente. Destacando que, probablemente, la fermentación con *Saccharomyces cerevisiae* incrementó la biodisponibilidad de nutrientes en la pulpa de plátano, potenciando la biomasa larval y mejorando los perfiles nutricionales. Esto se reflejó en los contenidos de proteína (37.50 ± 0.10 %) y de lípidos (43.62 ± 0.83 %), en larvas

MSN cultivadas con una dieta previamente fermentada. En cuanto al empleo del *frass* generado en los cultivos de larvas para producir biogás, se observó que el usar *Saccharomyces cerevisiae* como pretratamiento fermentativo (biológico), acoplado a la degradación con larvas de MSN, tiene un efecto positivo sobre el potencial metanogénico, ya que aumentó 15 veces más la producción de CH_4 con un valor de $284.34 \pm 29.89 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{g SV}^{-1}$, así como se hace la sugerencia de complementar el estudio al analizar los digestatos de los reactores posteriores a la DA.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) Unidad Mazatlán por el apoyo en el desarrollo de esta investigación, a la productora de alimentos CICLICA por la donación de larvas *H. illucens* utilizadas en el estudio, a la empresa BeGaia S.A de C.V por la donación de lodos para las pruebas de DA, a la M.C. Erika Yazmin Sánchez Gutiérrez y a la M.C. Francis Isela Marrojo López, por el apoyo en los análisis bromatológicos y determinaciones fisicoquímicas, al alumno Julio César Méndez Zamudio, por el apoyo en la fase experimental del estudio en el cultivo de larvas, así como en la realización de análisis proximales.

VI. REFERENCIAS

- [1] C. Liu, C. Wang y H. Yao, "Comprehensive Resource Utilization of Waste Using the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae)," *Animals*, vol. 9, no. 6, pp. 349–349, Jun., 2019. DOI: 10.3390/ani9060349
- [2] M. Renna, L. Gasco, L. Livorsi, M. Mele, G. Conte, M. Meneguz y C. Lussiana, "Growth performance, proximate composition and fatty acid profile of black soldier fly larvae reared on two grape pomace varieties," *Animal: An International Journal of Animal Bioscience*, vol. 18, no. 8, pp. 101240–101240, Aug., 2024. DOI: 10.1016/j.animal.2024.101240, [Online].
- [3] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, "Manos que dan de comer: Qué hay detrás de la producción de plátano," *Gob.mx*, 2025. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/manos-que-dan-de-comer-que-hay-detras-de-la-produccion-de-platano?idiom=es>, [Online].
- [4] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Panorama Agroalimentario: la ruta de la transformación agroalimentaria 2018–2024. p120–12. 2024. <https://online.pubhtml5.com/rsarc/ywrm/>
- [5] O. Patiño-Rodríguez, E. Agama, L. A. Bello-Pérez y D. Chavarria-Bolaños, "Alternativas para el aprovechamiento de subproductos agrícolas: plátano y mango," en *Aprovechamiento de subproductos de la Industria Alimentaria para la Obtención de Compuestos Bioactivos*, pp. 375–404, AGT Editor, S.A./CIAD/UAS, Jun., 2018. [Online].
- [6] F. Ijdema, S. Lievens, R. Smets, G. Poma, M. Van Der Borgh, B. Lievens y J. De Smet, "Modulating the fatty acid composition of black soldier fly larvae via substrate fermentation," *Animal*, vol. 19, no. 1, pp. 101383–101383, Jan., 2025. DOI: 10.1016/j.animal.2024.101383, [Online].
- [7] J. C. Ramírez Ramírez, A. Ortiz Luviano, J. A. López Rivas, B. Parra Pacheco y J. F. García Trejo, "Efecto de la fuente de proteína dietaria sobre el cultivo de larva de mosca soldado negra," *Emprennova*, vol. 2, no. 4, pp. 73–79, Dec., 2022. [Online].

- [8] Heuel, C. Sandrock, F. Leiber, A. Mathys, M. Gold, C. Zurbrüegg, I. D. M. Gangnat, M. Kreuzer y M. Terranova, "Black soldier fly larvae meal and fat as a replacement for soybeans in organic broiler diets: effects on performance, body N retention, carcass and meat quality," *British Poultry Science*, vol. 63, no. 5, pp. 650–661, Oct., 2022. DOI: 10.1080/00071668.2022.2053067, [Online].
- [9] I. M. Bermúdez-Serrano y O. A. Sánchez-Velázquez, "Comprehensive utilization of the Black Soldier Fly: Bioconversion, sustainability, and emerging challenges," *Scientia Agropecuaria*, vol. 14, no. 4, pp. 571–590, Oct., 2023. DOI: 10.17268/sci.agropecu.2023.047, [Online].
- [10] N. E. A. Basri, N. A. Azman, I. K. Ahmad, F. Suja, N. A. A. Jalil y N. F. Amrul, "Potential Applications of Frass Derived from Black Soldier Fly Larvae Treatment of Food Waste: A Review," *Foods (Basel, Switzerland)*, vol. 11, no. 17, pp. 2664–2664, Sep., 2022. DOI: 10.3390/foods11172664, [Online].
- [11] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), "Estudio del Potencial de Biomasa en México," 2018. Disponible en: <https://www.conuee.org.mx/index.php/component/k2/item/367-estudio-del-potencial-de-biomasa-en-mexico>, [Online].
- [12] American Public Health Association (APHA), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Washington, DC, 1999. [Online].
- [13] R.T. Herrera-Álvarez, V.M. Montes-Núñez, D. Santos-Ballardo, M. Betancourt-Lozano, B. Gómez-Gil, E. Navarro Barrón y K. Avelar, "Evaluación del potencial metanogénico de frass de *Hermetia illucens* pre-tratada con *Saccharomyces cerevisiae* y *Lactobacillus acidophilus*," *Revista Identidad*, vol. 7, pp. 104–109, Jan., 2024. [Online].
- [14] M. Ciani, F. Comitini, I. Mannazzu y P. Domizio, "Controlled mixed culture fermentation: a new perspective on the use of non-*Saccharomyces* yeasts in winemaking," *FEMS Yeast Research*, vol. 10, pp. 123–133, Feb., 2019. [Online].
- [15] G. Holeh, M. Opiyo, C. Brown, E. Sumbule, J. Gatagwu, E. Oje y F. Muniy, "Effect of different waste substrates on the growth, development and proximate composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae," *Livestock Research for Rural Development*, vol. 34, pp. 1–11, Jan., 2022. [Online].
- [16] E. Nyakeri, H. Ogola, M. Ayieko y F. Amimo, "Valorisation of organic waste material: Growth performance of wild black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) reared on different organic wastes," *Journal of Insects as Food and Feed*, vol. 3, pp. 1–10, Jan., 2017. DOI: 10.3920/JIFF2017.0004, [Online].
- [17] M. Zulkifli, A. Y. Seok-Kian, L. L. Seng, S. Mustafa, Y. S. Kim y R. Shapawi, "Nutritional value of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae processed by different methods," *PLOS ONE*, vol. 17, no. 2, pp. e0263924–e0263924, Feb., 2022. DOI: 10.1371/journal.pone.026392, [Online].
- [18] L. Loh y D. Lo, "Proximate and fatty acid analysis of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*)," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1169, no. 1, pp. 012082–012082, Jan., 2023. DOI: 10.1088/1755-1315/1169/1/012082, [Online].
- [19] R. Castro Rivera, M. M. Solís Oba, V. Chicatto Gasperin y A. Solís Oba, "Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)," *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 36, no. 3, pp. 529–539, May., 2021. DOI: 10.20937/rica.53545, [Online].
- [20] M. Łochyńska y J. Frankowski, "The biogas production potential from silkworm waste," *Waste Management*, vol. 79, pp. 564–570, Sep., 2018. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.08.019, [Online].
- [21] R. Divyabharathi, R. Angeeswaran, K. Jagadeeshkumar y S. Pugalendhi, "Characterization and Batch Anaerobic Digestion Study of Banana Wastes," *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 6, no. 7, pp. 2307–2315, Jul., 2017. DOI: 10.20546/ijemas.2017.607.331, [Online].
- [22] F. J. Ngabala y J. K. Emmanuel, "Potential substrates for biogas production through anaerobic digestion—an alternative energy source,"

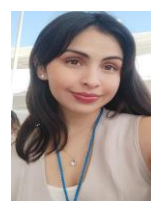
Heliyon, vol. 10, no. 23, pp. e40632–e40632, Jan., 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40632, [Online].

- [23] T. R. Lestari, G. L. Utama y A. B. Susanto, "Treatment of *S. cerevisiae* and dairy cow manure on organic waste for biogas production," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 483, no. 1, pp. 012032–012032, Jan., 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/483/1/012032, [Online].

BIOGRAFÍAS



ÁNGELA JOANNE VILLELA ROSAS Licenciada en Ciencias Biomédicas de la Universidad Autónoma de Occidente, Unidad Mazatlán. Su principal interés se centra en la investigación y difusión científica acerca de biocombustibles aprovechando el uso de residuos agroalimentarios. Actualmente, trabaja en un proyecto de investigación para optimizar la producción de biogás por medio de residuos orgánicos que puedan promover una estrategia dentro de la economía circular.



VERÓNICA VANESSA HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ Licenciada en Ciencias Biomédicas de la Universidad Autónoma de Occidente, Unidad Regional Mazatlán. Sus intereses dentro del ámbito de la investigación se centran en el manejo de organismos modelo, en este caso la mosca soldado-negra, *Hermetia illucens*, considerando sus potenciales dentro del manejo ambiental y Aprovechamiento como fuente de proteínas animales de uso alterno.



ERICK J. NAVARRO BARRÓN Ingeniero Bioquímico con maestría y doctorado en Ciencias con un enfoque en Microbiología. Actualmente, se desempeña como Investigador Posdoctoral de CONAHCYT en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) en Mazatlán y como docente en la Universidad Autónoma de Occidente (UAdeO). Su trayectoria de investigación se centra en la microbiología, con un énfasis particular en estudios metagenómicos mediante el uso de tecnologías de secuenciación de nueva generación y bioinformática. Actualmente, su línea de investigación se centra en la relación del microbioma con la salud y en el aprovechamiento de residuos orgánicos para la generación de proteína animal de alta calidad mediante el cultivo de la mosca soldado negro (MSN) y su relación con el microbioma.



BRUNO GÓMEZ GIL RODRÍGUEZ SALA Biólogo egresado de la Facultad de Ciencias, UNAM. Maestro en Ciencias del Mar en el área de Oceanografía Biológica y Pesquera y Doctor in Philosophy, University of Stirling, UK. Profesor Investigador Titular D en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) en Mazatlán, y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), nivel 3. Su interés en la investigación se centra en la diversidad de bacterias en ambientes acuáticos a través de un enfoque metagenómico y actualmente su investigación también se dirige al estudio de la biodiversidad de bacterias en sistemas de bioprocesos acoplados.



MIGUEL BETANCOURT LOZANO Biólogo marino. Maestro en Ciencias Marinas y Doctor; Doctor en Ciencias por el Instituto de Acuicultura de la Universidad de Stirling, en Escocia. Investigador Titular C y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), nivel 3. Su investigación se centra en el desarrollo de herramientas ecotoxicológicas orientadas a relacionar la presencia, persistencia y toxicidad de contaminantes con posibles alteraciones en sistemas biológicos. Bajo una perspectiva multidisciplinaria, aborda diversos aspectos relacionados con la problemática ambiental de los ecosistemas costeros del noroeste mexicano. En este sentido su interés también recae en el aprovechamiento de residuos orgánicos mediante bioprocesos.



KARLA DENISSE LUNA AVELAR Ingeniera Biotecnóloga, con Maestría y Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Investigadora Posdoctoral CONAHCYT en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), unidad Mazatlán; pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI), como candidata, y es miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigadora Honorífica. Ha realizado

investigación en el área de los alimentos, particularmente en la generación de productos, tomando como protagonista a las microalgas e involucrando herramientas de Ingeniería Genética. Actualmente su línea de investigación está dirigida al manejo sustentable de residuos orgánicos agroindustriales y a la generación de bioenergía, mediante el acoplamiento de bioprocesos.