

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

ISSN: 2448-7775

Análisis del potencial metanogénico de residuos agroindustriales de semillas de chile mirasol (*Capsicum annum* var. mirasol)

KARINA GONZÁLEZ RAMÍREZ¹, JANETH DANIEL CASESUS², KARLA DENISSE LUNA-AVELAR^{2,3}, MIGUEL BETANCOURT-LOZANO², LILIANA IVETTE ÁVILA-CÓRDOBA¹, DAVID ULISES SANTOS-BALLARDO^{2*}

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México, México.

²Laboratorio de Ecotoxicología y Bioprocesos, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Unidad Mazatlán. Mazatlán, Sinaloa, México.

³Estancias posdoctorales por México, SECIHTI-CIAD Mazatlán, Sinaloa, México.

*Autor de correspondencia: ulises.ballardo@ciad.mx

RESUMEN La Digestión Anaeróbica (DA) se considera eficiente para el tratamiento y aprovechamiento de residuos orgánicos. En el contexto de la economía circular, la DA es clave para la revalorización de residuos agroindustriales, como las semillas generadas en la producción y procesamiento de chile. El estudio evalúa el potencial metanogénico de semillas residuales de chile mirasol probando tres tipos de inóculos. Los resultados indicaron que el inóculo con mayor rendimiento alcanzó una producción acumulada de 856.97 ± 12.42 mL CH₄/gSV. En contraste, los inóculos restantes mostraron producciones considerablemente menores (entre 486.28 ± 15.69 y 503.19 ± 17.54 mL CH₄/gSV). Se realizó el ajuste de la cinética del proceso mediante un modelado de la producción acumulada utilizando el modelo de Gompertz modificado, permitiendo estimar la tasa máxima de producción teórica y el tiempo de latencia. Estos resultados aportan información valiosa para optimizar la gestión de residuos agroindustriales mediante la producción de biogás.

PALABRAS CLAVE — Biogás, digestión anaeróbica, modelo de Gompertz modificado, residuos agroindustriales, semillas de chile mirasol.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la creciente generación de residuos del sector agroindustrial representa un desafío significativo a nivel mundial, tanto desde una perspectiva medioambiental como socioeconómica [1, 2]. Estos residuos, provenientes de la transformación y procesamiento de productos agrícolas, suelen ser subutilizados o desechados inadecuadamente, lo que contribuye a la contaminación del suelo, agua y aire [1], además de implicar un desaprovechamiento de materiales que poseen un considerable potencial de valorización, lo que podría traducirse en beneficios económicos, energéticos o incluso alimentarios [3, 4].

De acuerdo con lo reportado por la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés, Food and Agriculture Organization) de las Naciones Unidas, a nivel global se desperdician aproximadamente 1.3 mil millones de toneladas de alimentos cada año, de las cuales, cerca de 998 millones de toneladas corresponden a los residuos agrícolas mal gestionados [5], lo que evidencia la urgencia de implementar estrategias de gestión sostenible y valorización de residuos [6].

Particularmente, para el sector agroindustrial mexicano dedicado al procesamiento de chiles, como la variedad

mirasol (*Capsicum annum* var. mirasol), se genera una cantidad considerable de residuos durante la etapa de secado, donde las semillas, pieles deterioradas y fragmentos del pericarpio suelen descartarse como desechos sin un tratamiento adecuado [7]. Estos subproductos poseen características fisicoquímicas con potencial para ser aprovechados para la generación de bioenergía, extracción de compuestos bioactivos, materia prima para compostaje o alimentación animal [8].

Cabe destacar que el chile es uno de los cultivos más emblemáticos y de mayor importancia cultural, gastronómica y económica en México. El país se posiciona como uno de los principales productores y consumidores de chile a nivel mundial, con una diversidad de especies cultivadas y una industria robusta de transformación, exportación y comercialización. Según la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, al cierre de 2023 se reportó una producción que superó 3,000, 237 mil toneladas. No obstante, a pesar de su relevancia, los residuos derivados del procesamiento del chile siguen siendo escasamente investigados y subvalorados [9, 10].

Esta falta de valorización no solo implica un problema de gestión de residuos, sino que además genera impactos

ambientales negativos, como la emisión de gases de efecto invernadero, contaminación de cuerpos de agua por lixiviación y la pérdida de recursos potencialmente utilizables [1, 11]. Asimismo, se desaprovechan oportunidades de desarrollo económico local y de generación de valor en comunidades productoras [5].

En este contexto, la Digestión Anaeróbica (DA) se presenta como un proceso biotecnológico de carácter sostenible, capaz de convertir residuos orgánicos en biogás. Este mecanismo se basa en la acción conjunta de comunidades microbianas que descomponen la biomasa, generando como productos principales metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) [6].

La producción de biogás a partir de subproductos agroindustriales presenta múltiples beneficios económicos y ambientales, ya que además de generar energía renovable, este proceso contribuye a promover una economía circular, la gestión eficiente de residuos y puede ser una fuente adicional de ingresos para los agricultores [3, 4, 13].

Por ello, el presente estudio evalúa el potencial metanogénico, conocido también como potencial bioquímico de metano (BPM) de las semillas residuales de chile mirasol (SC), empleando distintos tipos de inóculo. Se realizaron pruebas experimentales con el objetivo de determinar la viabilidad técnica del proceso, así como explorar la posibilidad de integrar subproductos de plantas tratadoras de aguas como agentes activos en sistemas de aprovechamiento bioenergético. La presente investigación contribuye al diseño de estrategias circulares orientadas a una gestión integral y sostenible de los residuos, en coherencia con los principios fundamentales de la bioeconomía actual y la economía circular.

II. DESARROLLO

A. MATERIALES

1. Material vegetal.

Las muestras de semillas de chile mirasol utilizadas en este estudio fueron donadas por el Rancho el Granado ubicado en la localidad de Ramón López Velarde, Zacatecas. Las semillas corresponden al residuo de la cosecha del año 2024, se mantuvieron almacenadas en condiciones óptimas (15 - 20 °C) para evitar que se genere humedad o contaminación por hongos.

El lote recibido corresponde a remanentes de chile mirasol (*Capsicum annuum* var. mirasol) sometido a un tratamiento de secado convencional, por túneles de hule y posteriormente de manera manual. En la primera etapa, los frutos frescos fueron distribuidos sobre una sola capa en el interior de túneles de hule negro, contruidos con arcos metálicos cubiertos con plástico negro o hule, generando un

efecto invernadero que permite la acumulación de calor por radiación solar directa. A medida que la temperatura interna sube, el contenido de humedad del chile disminuye y la estructura del pericarpio se vuelve quebradiza, facilitando el desprendimiento de las semillas.

En la segunda etapa correspondiente al secado manual, los chiles secos son manipulados mediante volteo y extendido, lo que provoca que las semillas se desprendan y puedan recolectarse de manera natural. Dicha técnica es importante para recuperar las semillas, ya que minimiza el daño y permite que se conserven las características morfológicas. Éstas una vez recuperadas, se guardaron en bolsas de plástico herméticamente cerradas (Ziploc®) y fueron almacenadas a 4 °C hasta su posterior uso.

2. Inóculo.

Se utilizaron tres inóculos distintos obtenidos de empresas ubicadas en la ciudad de Mazatlán, Sinaloa y que fueron codificadas de la siguiente manera:

- T: Lodos activados recuperados de la planta tratadora de agua de la Industria de Maíz y Trigo Tostaditas Blancas S.A. de C.V.
- B: Bioles recuperados del digestor mesofílico de la empresa de biofertilizantes BeGaia.
- P: Lodo activado recolectado de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Cervecería Pacífico.

B. MÉTODOS

1. Ubicación experimental.

El desarrollo experimental se llevó a cabo en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), Unidad Académica en Acuicultura y Manejo Ambiental, ubicada en Mazatlán, Sinaloa.

2. Molienda de semillas.

Las semillas fueron sometidas a un proceso de molienda con el objetivo de obtener una harina de granulometría fina y homogénea. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando un molino (Black & Decker®) diseñado para especias secas. La harina obtenida se almacenó en bolsas Ziploc selladas y se conservó a una temperatura de $4 \pm 1^\circ\text{C}$ hasta su utilización.

3. Caracterización de inóculo y sustrato.

Se llevaron a cabo análisis fisicoquímicos con el objetivo de cuantificar los contenidos de sólidos totales (ST) y volátiles (SV), contenido de humedad (H) y cenizas o sólidos fijos (SF), siguiendo los lineamientos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) [14].

La determinación de ST, consistió en calentar crisoles a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 h en un horno de secado (OHAUS AP210), se dejaron enfriar en un desecador y se tomó su peso (w_{crisol}). Posteriormente, se colocó 1 ± 0.004 g de semilla molida de chile, así como, 1.22 ± 0.28 g de muestra correspondientes al inóculo T; 7.04 ± 1.64 g para el inóculo B y finalmente 6.9 ± 0.93 g del inóculo P, se registró su peso (w_{muestra}), finalmente se secaron las muestras a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 h. Se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se registró el peso (w_{total}).

El porcentaje de ST se calculó utilizando la Ec. (1). El resultado se presentó como porcentaje promedio ($n = 3$) con desviación estándar [14].

$$\% ST = \frac{w_{\text{total}} - w_{\text{crisol}}}{w_{\text{muestra}} - w_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (1)$$

El contenido de humedad se calculó con la Ec. (2), calculando la diferencia en porcentaje de los ST.

$$\% H = 100 \% - \% ST \quad (2)$$

Para el cálculo de SV y los SF, los platos de evaporación con las muestras secas se calcinaron utilizando una mufla (Felisa FE-363) a $550 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 2 h, posteriormente el residuo fue pesado ($w_{\text{volátil}}$). Los SV y SF se calcularon por triplicado y se presentan como porcentajes promedios con desviación estándar, para los cálculos correspondientes se emplearon las Ecs. (3) y (4) [14].

$$\% SV = \frac{w_{\text{total}} - w_{\text{volátil}}}{w_{\text{total}} - w_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (3)$$

$$\% SF = \frac{w_{\text{volátil}} - w_{\text{crisol}}}{w_{\text{total}} - w_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (4)$$

4. Diseño experimental.

Se desarrollaron pruebas de potencial metanogénico por lotes, para ellos se prepararon reactores de 60 mL con un volumen de trabajo de 35 mL, sellados con tapas de aluminio con septum para punción, a los cuales se añadieron inóculo y biomasa (SC) como sustrato en una relación 2:1 (inóculo: sustrato) con base a sólidos volátiles, siguiendo la configuración experimental de la Tabla I. Para el cálculo de SV requeridos se utilizó la Ec. (5), cada combinación de tratamiento se evaluó por triplicado y se presentó la desviación estándar [13, 15].

$$gSV = \frac{vol}{m} (ST)(SV) \quad (5)$$

De manera paralela, el inóculo se empleó como control negativo, con el propósito de restar la producción endógena del mismo a la generada por el sustrato. Como control positivo se utilizaron reactores adicionados con celulosa. Los biorreactores se mantuvieron bajo condiciones controladas de $37 \pm 1^\circ\text{C}$ con una agitación constante de 150 rpm durante un periodo de 46 días, empleando una incubadora CSRCientific CVP-500 [12, 13, 15].

TABLA I. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL.

Tratamiento	Sustrato	Inóculo	Réplicas
SC+T	Semilla molida	Tostaditas	3
SC+B	Semilla molida	BeGaia	3
SC+P	Semilla molida	Cervecería Pacífico	3

Dónde: SC, es la semilla molida; T: inóculo de Tostaditas; B: inóculo BeGaia y, P: inóculo Cervecería Pacífico.

La producción de biometano se monitoreó diariamente mediante un método volumétrico utilizando un eudiómetro. En este dispositivo, el dióxido de carbono (CO_2) fue retenido a través de una disolución de hidróxido de sodio (NaOH 1N), lo que permitió cuantificar el metano (CH_4) generado. De manera complementaria, se empleó un manómetro SMC ISE20-P para registrar la presión interna del biorreactor (en MPa) y calcular la producción total de biogás, con lo cual se determinó el porcentaje de metano presente. Los resultados se expresaron en mililitros de metano por gramo de sólido volátil añadido al reactor ($\text{mL CH}_4 / \text{gSV}$), presentándose como valores promedio ($n=3$) acompañados de su desviación estándar [12, 13, 15].

5. Modelo de Gompertz modificado (MGM).

La cinética de producción acumulada de metano ($\text{mL CH}_4 / \text{gSV}$) se modeló mediante la ecuación de Gompertz Modificada Ec. (6), para analizar el comportamiento y desempeño del sistema durante el proceso de digestión anaeróbica [16].

$$M = P \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_{\text{max}} \cdot e}{P} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (6)$$

Dónde: M, es el potencial metanogénico acumulado por gramo de sólido volátil ($\text{mL CH}_4 / \text{gSV}$); P, la producción máxima ($\text{mL CH}_4 / \text{gSV}$); t, el tiempo (días); R_{max} , la tasa de producción máxima diaria ($\text{mL CH}_4 / \text{gSV} / \text{día}$); y finalmente, λ corresponde al tiempo de la fase de latencia (días).

6. Análisis estadístico.

Se realizaron pruebas estadísticas para las producciones acumuladas de metano ($\text{mL CH}_4 / \text{gSV}$) obtenidas bajo las diferentes configuraciones de las pruebas metanogénicas. Éstas se realizaron utilizando el software SigmaPlot versión 12.5®, para ello se analizó la homocedasticidad de los datos mediante la prueba de igualdad de varianzas (Equal Variance Test); además, se hicieron las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk; posteriormente se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), seguido de la prueba de Tukey con un índice de probabilidad de $p \leq 0.05$.

III. RESULTADOS

1. Determinación de sólidos volátiles (SV), humedad (H) y sólidos fijos (SF) o cenizas.

En la [Tabla II](#) se muestran los resultados de la caracterización de sustratos e inóculos. Respecto a estos parámetros, los resultados muestran que el sustrato (SC) presenta una muy baja humedad (6.31 ± 0.06 %) y un contenido alto de ST de 93.68 ± 0.06 %, lo que indica que se trata de un material muy seco. Mientras que el contenido de SV muestra un valor muy alto (95.99 ± 0.11 %), lo cual indican una proporción muy elevada de materia orgánica biodisponible, por lo que se podría considerar como sustrato adecuado para el proceso de digestión anaeróbica [17].

TABLA II. CARACTERIZACIÓN DE LOS INÓCULOS Y SUSTRATO UTILIZADOS EN LA DA.

	SC	T	B	P
% H	6.31 ± 0.06	98.13 ± 0.32	90.49 ± 0.1	88.9 ± 0.39
% ST	93.68 ± 0.06	1.8 ± 0.33	9.5 ± 0.1	11.09 ± 0.39
% SV	95.99 ± 0.11	77.66 ± 2.69	56.43 ± 0.39	30.70 ± 0.45
% SF	4.00 ± 0.11	22.33 ± 2.69	43.56 ± 0.39	69.29 ± 0.45

Dónde: H: Humedad; ST: Sólidos totales; SV: Sólidos volátiles; SF: Sólidos fijos o cenizas; SC: semilla molida; T: inóculo tostaditas blancas; B: inóculo BeGaia; P: inóculo Cervecería Pacífico.

Por otro lado, el bajo contenido de SF, sugiere una escasa presencia de material inorgánico o cenizas, lo que resulta conveniente para materiales candidatos para DA [14,15].

Respecto a los inóculos, el inóculo T presentó el mayor contenido de humedad (98.13 ± 0.32 %) y el menor contenido de ST (1.8 ± 0.33 %), lo que indica una muy baja concentración de biomasa sólida, aunque con un alto contenido de SV (77.66 ± 2.69 %), lo cual se puede traducir en un buen potencial de actividad microbiológica [18].

El inóculo B, mostró un contenido de ST más elevado (9.5 ± 0.1 %), con una proporción moderada de SV (56.43 ± 0.39 %), lo que indica una mezcla más balanceada entre la fracción orgánica e inorgánica. El inóculo P presentó los valores más altos de SF (69.29 ± 0.45 %) y los más bajos de SV (30.70 ± 0.45 %) lo que indica una carga orgánica limitada y una alta proporción de material inerte, lo que puede limitar su eficacia como inóculo activo en la DA, estos resultados concuerdan con lo que se han reportado previamente para lodos activados de este tipo [15, 16, 19].

2. Potencial metanogénico.

Los valores experimentales de producción acumulada de metano tras 46 días de retención hidráulica oscilaron entre 486.28 ± 15.69 y 856.97 ± 12.42 mL CH_4/gSV (Tabla III),

lo cual representa un alto valor obtenido por el sustrato, esto se puede atribuir a la presencia de materia orgánica de alta energía disponible para los microorganismos metanogénicos. Se ha reportado que los lípidos poseen un poder calorífico superior al de los carbohidratos y proteínas, alcanzando hasta 1.014 mL CH_4/g de lípido, lo cual incrementa el potencial bioquímico de metano cuando son degradados eficientemente [19].

Por otro lado, el inóculo T presentó el mejor desempeño, alcanzando una producción acumulada de 856.97 ± 12.42 mL CH_4/gSV , este valor superó a los obtenidos con el inóculo B (503.19 ± 17.54 mL CH_4/gSV) y P (486.28 ± 15.69 mL CH_4/gSV), los cuales no mostraron diferencias significativas. La mayor eficiencia del inóculo T puede estar atribuida a una mejor adaptación de su comunidad microbiana a la degradación de compuestos complejos presentes en las semillas, dicho inóculo proviene de una planta tratadora de agua de una empresa que trabaja con maíz y tortillas, por lo que los microorganismos presentes pudieron tener afinidad a los compuestos presentes en las semillas [19].

3. Ajuste con el modelo de Gompertz Modificado (GM).

El modelo de Gompertz modificado fue utilizado para ajustar las curvas experimentales de producción acumulada de metano (Fig. 1), con el objetivo de modelar la cinética del proceso y predecir algunos parámetros de ésta. El ajuste se realizó mediante el software de SigmaPlot, obteniéndose coeficientes de correlación (R^2) mayores a 0.96, lo que indica una buena representatividad del modelo respecto a los datos experimentales.

En la [Tabla III](#) se muestra que, para todos los casos, el modelo mostró un buen ajuste, a pesar de ello las estimaciones predichas presentaron valores muy cercanos respecto a los valores experimentales con los inóculos B y P; en cuanto al tratamiento SC+T se observaron variaciones más importantes; la producción estimada fue de 777.74 ± 18.29 mL CH_4/gSV , predicción inferior al valor experimental (856.97 ± 12.42 mL CH_4/gSV). Este desajuste puede estar relacionado con la variabilidad inherente en la degradación de lípidos y su posible acumulación transitoria de ácidos grasos volátiles [17].

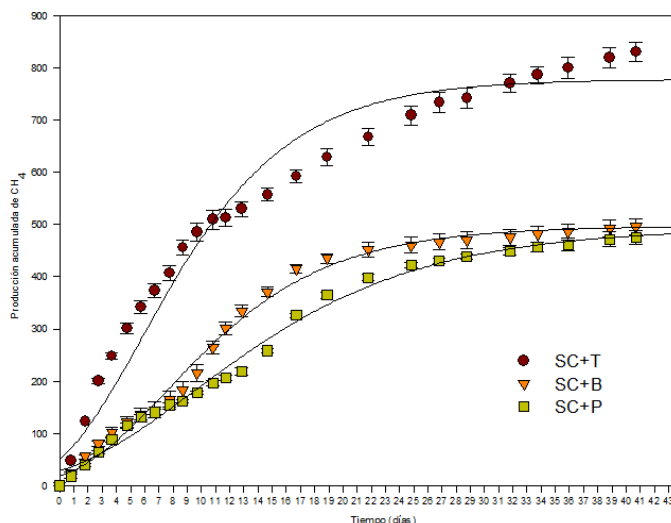


Fig. 1. Potencial bioquímico de metano (BPM) expresado en mL CH_4/gSV . La línea sólida representa el ajuste del modelo de Gompertz Modificado. SC: semilla completa; T: inóculo tostaditas blancas; B: inóculo BeGaia; P: inóculo Cervecería Pacífico.

TABLA III. PRODUCCIÓN ACUMULADA DE METANO (CH_4) EXPERIMENTAL Y TEÓRICA CON EL MODELO DE GOMPERTZ MODIFICADO.

Trat.	PA	P	Rmax	λ	R^2
SC+T	856.97 $\pm$ 12.42 ^a	777.74 $\pm$ 18.29	48.70 $\pm$ 4.27	0.67 $\pm$ 0.01	0.9631
SC+B	503.19 $\pm$ 17.54 ^b	496.83 $\pm$ 6.36	28.58 $\pm$ 1.24	1.20 $\pm$ 0.34	0.9924
SC+P	486.28 $\pm$ 15.69 ^b	493.90 $\pm$ 9.06	20.03 $\pm$ 0.85	0.46 $\pm$ 0.43	0.9921

Letras diferentes representan diferencias estadísticas para los datos en la columna ($n=3$, Tukey $P \leq 0.05$). Donde: Trat.: Tratamiento; SC: semilla completa; T: inóculo tostaditas blancas; B: inóculo BeGaia; P: inóculo Cervecería Pacífico; PA: Producción Acumulada de Metano Experimental ($\text{mL CH}_4/\text{gSV}$); P: Producción Teórica Máxima de Metano ($\text{mL CH}_4/\text{gSV}$); R_{max} : Tasa de Producción Máxima Diaria ($\text{mL CH}_4/\text{gSV}/\text{día}$); λ : Tiempo de la Fase de Latencia (días); R^2 : Coeficiente de determinación.

En cuanto a la tasa diaria de producción de metano, se registraron los valores más altos en el tratamiento SC+T ($48.70 \pm 4.27 \text{ mL CH}_4/\text{gSV} \cdot \text{día}$), seguido de SC+B ($37.52 \pm 3.47 \text{ mL CH}_4/\text{gSV} \cdot \text{día}$). Este comportamiento refleja no solo una mayor producción total, sino una mayor velocidad de conversión de la materia orgánica a metano en presencia de lípidos y un inóculo eficiente [20].

Por otro lado, el tiempo de latencia fue determinado también por el modelo de Gompertz, en general se observó que hay una fase de adaptación inicial, esta no es excesiva, lo cual puede deberse a que el sistema cuenta con inóculos previamente adaptados y que la concentración de lípidos no supera el umbral inhibitorio, particularmente con el inóculo P (0.46 ± 0.43 días), seguido por el inóculo T (0.67 ± 0.01 días), lo que sugiere una adaptación rápida de los consorcios microbianos al sustrato [20].

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que el uso de la SC puede favorecer significativamente el proceso de metanogénesis; la presencia de compuestos orgánicos

fácilmente biodegradables y el contenido lipídico del material parecen contribuir a una mayor producción de biometano, lo que se traduce en una ganancia considerable del potencial energético del sustrato. Lo cual sugiere que el sustrato representa una alternativa viable dentro de esquemas de valorización de residuos agroindustriales. No obstante, su implementación debe evaluarse cuidadosamente en función del objetivo específico del proceso. El modelado realizado logró un ajuste adecuado a los datos experimentales, especialmente en los tratamientos con menor variabilidad.

Finalmente, es importante comentar que una de las aplicaciones principales del biometano es la generación de energía ya sea mediante calor y/o electricidad. Realizar la estimación de la energía eléctrica que potencialmente se puede obtener a partir del metano generado es altamente recomendable, esto para analizar y predecir costos de inversión y operativos de una potencial planta piloto de DA, entonces, tomando en cuenta el poder calorífico del biogás, que es el equivalente a un aproximado de 10 kWh por m^3 [20, 21], en el presente trabajo, con la producción obtenida en el mejor escenario, de $859.97 \text{ mL CH}_4/\text{gSV}$ se calcula el equivalente a 0.00085997 m^3 de metano producido a partir de 1 g de sólido volátil del material, lo que representaría alrededor de 0.00085997 kWh de electricidad; dicho valor pudiera parecer bajo, sin embargo, para poner en contexto del potencial energético real del sustrato en estudio, se debe tomar en cuenta las grandes cantidades de semilla residual que se genera en la industria del secado de chile; entonces, por cada tonelada de semilla residual se producirían aproximadamente 85.997 kWh de electricidad, lo que sería equivalente a casi la mitad del consumo de una casa de bajo requerimiento en México (con promedio registrado entre 200 y 800 kWh) [22].

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran el potencial de revalorización mediante el proceso de digestión anaerobia del residuo agroindustrial de chile mirasol estudiado. La comparación entre los distintos inóculos utilizados permitió identificar diferencias importantes en términos de producción de biogás, eficiencia de degradación y estabilidad del proceso.

Los resultados evidenciaron que el inóculo T presentó una mayor adaptación y eficiencia en la degradación del sustrato en estudio, lo que se reflejó en potencial metanogénico superior utilizando dicho consorcio microbiano, optimizando la producción de biogás y la estabilidad del sistema. Este hallazgo sugiere que la elección del inóculo es un factor determinante para el rendimiento de los sistemas de DA.

Los resultados obtenidos muestran que los subproductos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales pueden convertirse en una alternativa viable y sostenible

como fuente de inóculo. Su incorporación en esquemas de aprovechamiento energético y reducción de residuos abre la posibilidad de integrar procesos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. La interacción entre residuos agroindustriales e inóculos favorece la optimización de la valorización orgánica, impulsa un uso más racional de los recursos y contribuye a disminuir los impactos ambientales derivados de una disposición inadecuada de desechos.

En conjunto, los hallazgos de este trabajo respaldan la pertinencia de aplicar modelos de economía circular en el ámbito agroindustrial, generando nuevas oportunidades para el tratamiento integral de residuos y la producción de bioenergía. Se sugiere que investigaciones futuras amplíen este enfoque, incorporando análisis complementarios que consideren no solo el potencial energético, sino también la composición química detallada de los materiales, así como estudios de caracterización metagenómica de los consorcios microbianos implicados.

REFERENCIAS

- [1] Aguilera-Flores, M. M., Garay-Fernández, A. K., Contreras-Ramírez, M. L., Ávila-Vázquez, V., & Rodríguez-Martínez, Y. Y. (2021). Diagnóstico de las prácticas comunes del manejo de residuos en localidades marginadas: Un caso de estudio. *Revista De Ciencias Ambientales*, 55(2), 250–270. Consultado en: Junio, 7, 2025, DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.12>, [Online]
- [2] Ritchie, H., & Roser, M. (2023). Agricultural production. *Our World in Data*. Consultado en: Junio, 7, 2025, <https://ourworldindata.org/agricultural-production>, [Online]
- [3] Ellacuriaga, M., García-Cascallana, J., & Gómez, X. (2021). Biogas production from organic wastes: Integrating concepts of circular economy. *Fuels*, 2(2), 144–167. Consultado en: Junio, 7, 2025, DOI: <https://doi.org/10.3390/fuels2020009>, [Online]
- [4] Fares Almomani, & Bhosale, R. R. (2020). Enhancing the production of biogas through anaerobic co-digestion of agricultural waste and chemical pre-treatments. *Chemosphere*, 255, 126805. Consultado en: Junio, 7, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126805>, [Online]
- [5] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture. [Online]. Available: <https://www.fao.org/publications/sofa/2022/en/>
- [6] Sevillano, C. A., Pesantes, A. A., Peña Carpio, E., Martínez, E. J., & Gómez, X. (2021). Anaerobic digestion for producing renewable energy—the evolution of this technology in a new uncertain scenario. *Entropy*, 23(2), 145. Consultado en: Junio, 3, 2025, DOI: <https://doi.org/10.3390/e23020145>, [Online]
- [7] Jalgaonkar, K., Mahawar, M. K., Girijal, S., & Hp, G. (2024). Post-harvest profile, processing and value addition of dried red chillies (*Capsicum annum* L.). *Journal of food science and technology*, 61(2), 201–219. Consultado en: Junio, 11, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05656-1>, [Online]
- [8] Anaya-Esparza, L. M., Mora, Z. V. D. L., Vázquez-Paulino, O., Ascencio, F., & Villarruel-López, A. (2021). Bell peppers (*Capsicum annum* L.) losses and wastes: Source for food and pharmaceutical applications. *Molecules*, 26(17), 5341. Consultado en: Junio, 11, 2025, DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26175341>, [Online]
- [9] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). México, entre los principales productores de chile verde en el mundo (Comunicado de prensa). [Online]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/mexico-entre-los-principales-productores-de-chile-verde-en-el-mundo-agricultura?idiom=es>
- [10] Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO). (2017). Chile, producto tradicional de la gastronomía mexicana. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/firco/articulos/chile-producto-tradicional-de-la-gastronomia-mexicana?idiom=es>
- [11] Financial Times. (2024, June 8). Global population to shrink this century as birth rates fall. [Online]. Available: <https://www.ft.com/content/2d37dc16-5c73-4f2a-92a5-a78326f9dc3d>
- [12] Herrera-Álvarez, R. T., Montes-Núñez, V. M., Santos-Ballardo, D. U., Betancourt-Lozano, M., Gómez-Gil, B., Navarro-Barrón, E. J., & Luna-Avelar, K. D. (2024, diciembre). Evaluación del potencial metanogénico de frass de *Hermetia illucens* pre-tratada con *Saccharomyces cerevisiae* y *Lactobacillus acidophilus*. *Identidad Energética*, 7(2), 104–109. https://www.cinergiaug.org/assets/files/RIE_Vol.-7_No.2_202414.pdf
- [13] U.S. Environmental Protection Agency. (2001). Method 1684: Total, fixed, and volatile solids in water, solid, and biosolids draft. EPA-821-R-01-015. Consultado en: Junio, 13, 2025, DOI: <https://nepis.epa.gov/Exec/QueryNET.exe/P1002CZ8.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C00thru05%5CTxt%5C00000016%5CP1002CZ8.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>, [Online]
- [14] M. J. C. de la Rubia, R. A. Fernández, & M. J. Sánchez. (2017). Biogas production from organic waste: Technologies and perspectives. *Waste Management*, 59, 199–208.
- [15] Ponsá, S., Gea, T., & Sánchez, A. (2011). Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with several pure organic co-substrates. *Biosystems Engineering*, 108(4), 352–360. Consultado en: Junio, 15, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.01.007>, [Online]
- [16] Patil, N. A. & Jha M. K. (2018). Assessment of total and volatile solids in organic waste management and their influence on anaerobic digestion processes. *Waste Management*, 72, 65–73.
- [17] Wang, X., Duan, X., Chen, J., Fang, K., Feng, L., Yan, Y., & Zhou, Q. (2016). Enhancing anaerobic digestion of waste activated sludge by pretreatment: effect of volatile to total solids. *Environmental technology*, 37(12), 1520–1529. Consultado en: Junio, 19, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1120783>, [Online]
- [18] Alves, M. M., Pereira, M. A., Sousa, D. Z., Cavaleiro, A. J., Picavet, M., Smidt, H., & Stams, A. J. (2009). Waste lipids to energy: How to optimize methane production from long-chain fatty acids (LCFA). *Microbial Biotechnology*, 2(5), 538–550. Consultado en: Junio, 11, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2009.00100.x>, [Online]
- [19] Luna-Avelar, K. D., Barrena, R., Font, X., Sánchez, A., Santos-Ballardo, D. U., Germán-Báez, L. J., & Valdez-Ortiz, A. (2021). A preliminary assessment of anaerobic co-digestion potential of mango and microalgal residue biomass using a design of experiments approach: Effect of thermal, physical and biological pretreatments. *Food and Bioproducts Processing*, 128, 143–152. Consultado en: Junio, 14, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.04.015>, [Online]
- [20] S. Suhartini, Y. P. Lestari y I. Nurika, "Estimation of methane and electricity potential from canteen food waste", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 230, p. 012075, febrero de 2019. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1088/17551315/230/1/012075>.
- [21] Velarde-Meza, J.C., Tiznado-Osuna, L.J., Aguilera-Hernández, Y.M., Santos-Ballardo, D.U. (2023). Producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de mango Ataulfo y heces caninas. *Identidad Energética*, 6(1), 31–37.
- [22] Reguladores (2025). Consumo de energía eléctrica en México. <https://www.reguladores.com.mx/blog/consumo-de-energia-electrica/>. Consultado en: Agosto, 13, 2025.

BIOGRAFÍAS



KARINA GONZÁLEZ RAMÍREZ Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Energéticos Sustentables en la Universidad Autónoma del Estado de México. Acreditada del Diplomado en Educación Ambiental y los ODS por la UAEMex, UPN y el Ayuntamiento de Toluca. Mentora en el Programa Tecnológicas y niñas STEAM dirigido a infantes y jóvenes mujeres para promover el interés y la participación en carreras tecnológicas y científicas. Miembro del SDG Student Hub de la UAEMex y voluntaria en proyectos socioambientales. Galardonada a nivel municipal por su labor en medio ambiente, ha participado como ponente en congresos nacionales e internacionales. Su interés se centra en la gestión integral de residuos orgánicos y el desarrollo de soluciones sostenibles.



JANETH DANIEL CASESUS Ingeniera en Energía, actualmente estudiante de la Maestría en Ciencias en el Centro de Investigación en Alimentos y Desarrollo (CIAD). Su formación se ha enfocado en proyectos de energía limpia y sostenible, orientados a la mitigación del cambio climático. Autora de un artículo de divulgación científica. Actualmente desarrolla su proyecto de investigación en el aprovechamiento de residuos agroindustriales para la obtención de compuestos de alto valor agregado, bajo un enfoque de biorrefinería, con el objetivo de contribuir a la transición energética y al aprovechamiento integral de recursos en el sector agroindustrial.



KARLA D. LUNA AVELAR Ingeniera Biotecnóloga, con Maestría y Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Investigadora Posdoctoral CONAHACYT en CIAD, unidad Mazatlán; pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), como candidato. 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.



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.



LILIANA IVETTE ÁVILA CÓRDOBA Licenciada en Química Farmacéutica Bióloga; Doctora y Maestra en Ciencias Ambientales. Miembro del SNII de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) Nivel I. Distinguida internacionalmente como Dictaminadora para el Journal of Cleaner Production-Elsevier, desde septiembre 2019. Líder del Cuerpo Académico: "Materiales para Energía y Sustentabilidad". Es autora y coautora de diversas publicaciones nacionales e internacionales en importantes editoriales y revistas arbitradas e indexadas. Profesora-investigadora adscrita a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México.



DAVID U. SANTOS BALLARDO. Ingeniero Bioquímico; Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos; Doctor en Biotecnología Ambiental, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Investigador Titular B de CIAD Unidad Mazatlán; Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel 1; Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigador Honorífico; Miembro de la Red Mexicana de Bioenergía y de la Red Temática de Bioenergía; Autor de publicaciones científicas en revistas indexadas, actualmente desarrollando investigación relacionada con el desarrollo de energías renovables, específicamente biocombustibles de segunda y tercera generación, así como el desarrollo de biorrefinerías que promuevan la sostenibilidad de diversos procesos para la generación de bioproductos de alto valor.