

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

ISSN: 2448-7775

Aprovechamiento bioenergético de los residuos agroindustriales de chile mirasol (*Capsicum annum cv mirasol*)

JANETH DANIEL-CASESUS¹, KARINA GONZALEZ-RAMÍREZ², GABRIELA AGUILAR-ZÁRATE¹, KARLA DENISSE LUNA-AVELAR^{1,3}, MIGUEL BETANCOURT-LOZANO¹, DAVID ULISES SANTOS-BALLARDO^{1*}.

¹Laboratorio de Ecotoxicología y Bioprocesos, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. Mazatlán, Sinaloa, México

²Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México, México

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

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

RESUMEN El procesamiento agroindustrial de secado del chile mirasol para obtener chile guajillo, genera semillas que comúnmente se desechan, a pesar de su potencial para la producción de biocombustibles. Estas semillas contienen lípidos que pueden extraerse y transformarse en biodiésel mediante procesos de transesterificación; una vez extraído el aceite, la biomasa residual desgrasada aún posee un alto contenido de materia orgánica, lo que la convierte en un sustrato adecuado para digestión anaerobia y generación de biometano. Este enfoque integral puede maximizar el aprovechamiento de dichos subproductos al obtener múltiples productos de valor a partir de una misma biomasa. Este trabajo evalúa el potencial energético de semillas residuales de chile mirasol como materia prima para biodiésel y biogás, obteniendo un porcentaje de extracción de aceite de alrededor de 13 % y potencial metanogénico de la biomasa desgrasada que osciló entre 449 y 779 mililitros de metano por gramo de sólido volátil.

PALABRAS CLAVE— Biorrefinería, biodiésel, digestión anaerobia, residuos agroindustriales.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la agroindustria genera más de 1,300 millones de toneladas de residuos cada año, de los cuales una gran parte es eliminada mediante incineración o disposición en vertederos, prácticas que contribuyen significativamente a la contaminación del aire, el suelo y el agua [1, 2]. Este tipo de manejo no solo acelera la degradación ambiental, sino que también está asociado con la proliferación de microorganismos patógenos, malos olores y la generación de lixiviados contaminantes [1, 3]. Ante este panorama, la valorización de residuos agroindustriales ha emergido como una alternativa sostenible con amplio potencial de aplicación.

Una de las opciones con mayor proyección es la transformación de estos residuos en productos de valor agregado, tales como biocombustibles y biofertilizantes [4, 5]. En este contexto, las biorrefinerías surgen como una estrategia clave, ya que permiten integrar diversas rutas de valorización bajo un enfoque sistémico, eficiente y ambientalmente responsable. Este concepto, que se encuentra enmarcado dentro de los principios de la economía circular, busca transformar la biomasa residual en múltiples productos de alto valor, reduciendo la dependencia de recursos fósiles y fomentando un modelo productivo más sostenible [2, 6, 7].

Ante esta oportunidad, dos puntos clave son la investigación y el desarrollo de tecnologías emergentes, ya que, la maduración de estos aspectos permitiría desarrollar métodos de extracción de los componentes de interés presentes en los residuos seleccionados como materia prima de una manera más óptima y eficiente, así como alcanzar viabilidad tanto técnica como económica ante la utilización y el procesamiento de este tipo de materiales para la obtención de productos de valor, y facilitar su incorporación en la industria a mediana o gran escala [6]. Una de las ventajas de las biorrefinerías es la flexibilidad de procesar y transformar distintos tipos de biomasa. Esta flexibilidad otorga el acceso a implementar este tipo de instalaciones en diferentes regiones mediante el aprovechamiento de materias primas locales [4].

México es uno de los principales productores de chile a nivel mundial, debido a su diversidad climática y su infraestructura agrícola. De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) [8], en el año 2023 se sembraron alrededor de 165,226 hectáreas de este cultivo, alcanzando una producción superior a los 3.6 millones de toneladas. Esta dimensión de producción lleva de la mano a la generación de volúmenes de residuos agroindustriales significativos, en forma de semillas, tallos y

tejidos no comestibles, que generalmente son desechados sin un procesamiento o tratamiento adecuado [9, 10].

Los principales chiles cultivados en México reportados son el jalapeño, serrano, poblano y mirasol. Este último tiene gran importancia comercial ya que al secarse se obtiene el chile guajillo, el cual es ampliamente utilizado en la gastronomía mexicana y cuyo procesamiento genera una gran cantidad de subproductos, específicamente en forma de semillas, las cuales no son gestionadas de una manera adecuada y actualmente no se considera su valorización. No obstante, diversos estudios han reportado que las semillas de chile contienen diversos compuestos bioquímicos de alto interés comercial lo que las sitúa como una materia prima potencial para procesos de biorrefinería [1, 2].

En este sentido, el concepto de biorrefinería propone la extracción y aprovechamiento integral de estos compuestos, obteniendo aceite con potencial aplicación en la producción de biodiésel y de manera paralela, la biomasa desgrasada queda disponible para ser empleada como sustrato en procesos de digestión anaerobia para la generación de biogás. Dicho concepto se enfoca en promover una economía circular en la que los residuos agroindustriales se transforman en recursos energéticos valiosos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y a la generación de beneficios económicos [11, 12].

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo la evaluación del potencial de valorización de las semillas residuales de chile mirasol (generados durante su transformación en chile guajillo), mediante la determinación de su contenido de aceite y el uso de la biomasa desgrasada como sustrato en la producción de biogás. Con ello, se busca establecer y proponer las bases de un modelo sostenible de aprovechamiento de subproductos agrícolas que fomente la transición hacia esquemas de producción más responsables, eficientes y respetuosos con el medio ambiente.

II. DESARROLLO

A. MATERIALES

Las semillas de chile mirasol con las que se desarrolló el presente trabajo fueron donadas por la secadora de chiles “Rancho el Granado” S.A de C.V., ubicada en Ramón López Velarde Zacatecas, México. La recolección del material se realizó durante la temporada de cosecha y secado del año 2024. El secado del chile mirasol para la obtención del chile guajillo se efectuó mediante un método convencional, empleando túneles de hule y calor solar. Cabe mencionar que durante este procesamiento no se utilizaron aditivos ni compuestos químicos.

Para las pruebas de digestión anaerobia se utilizaron 3 inóculos para analizar la afinidad de estos con el sustrato propuesto. Se utilizaron lodos activados de las plantas tratadoras de agua de dos empresas de Mazatlán, Sinaloa.

Dichas empresas fueron “Cervecería Pacífico” (P) y la de Industria de Maíz y Trigo “Tostaditas Blancas” (T), el tercer inóculo consistió en digestato obtenido de los digestores anaeróbicos de la empresa elaboradora de biofertilizantes BeGaia® (B). Los inóculos se mantuvieron en condiciones anaeróbicas a temperatura ambiente para generar inanición previa a los experimentos de potencial metanogénico [12].

B. MÉTODOS

1. Extracción de aceite

El procedimiento experimental se llevó a cabo en el Centro de Investigación en Alimentos y Desarrollo (CIAD), unidad Mazatlán. Las semillas se trituraron utilizando un molino eléctrico comercial hasta obtener una harina homogénea. Esta harina se almacenó en refrigeración a -4 ± 1 °C hasta el momento de su análisis y procesamiento.

Las semillas fueron previamente acondicionadas para proceder con la extracción mecánica de lípidos a partir de la semilla previamente molida. Esta extracción se realizó en una prensa expeller automática (modelo MLM-1515130776). La operación tuvo lugar en la Universidad Politécnica del Mar y la Sierra (UPMYS), donde se trabajó con cuatro muestras de 250 g de semilla molida seca, el material obtenido se denominó biomasa de semilla desgrasada (BSD).

2. Determinación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y cenizas (CZ). Extracción de aceite

El contenido de sólidos totales (ST), humedad (H), sólidos volátiles (SV) y cenizas (CZ) fueron evaluados de acuerdo con el método reportado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) [11]. Estos análisis se realizaron a la BSD (sustrato) y a los 3 inóculos utilizados.

Para la cuantificación de ST, los crisoles se acondicionaron en un horno de convección (Novatech® HS35-ED) a 105 ± 2 °C hasta alcanzar peso constante. Después de enfriarlos en desecador, se registró el peso de los crisoles vacío (P_{crisol}). Después, se depositaron aproximadamente 5 g de muestra y se determinó el nuevo peso (P_{muestra}). Las muestras se sometieron a secado a $103-105$ °C durante 24 h, y una vez alcanzada la temperatura ambiente se registró el peso final (P_{total}). Cada determinación se realizó por triplicado y los resultados se expresaron como promedio $\pm$ desviación estándar. El cálculo de ST se efectuó con la Ec (1):

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

La humedad fue calculada por diferencia, considerando que la suma de humedad y ST son igual al 100 % de la materia. La determinación de sólidos volátiles (SV) y cenizas (CZ) se calcularon a partir de los ST obtenidos, para ello las

muestras previamente secas se llevaron a calcinación a 550°C durante 120 min. Luego del enfriamiento en desecador, se registró el peso del residuo ($P_{volátil}$). Cada análisis se efectuó por triplicado, presentando los resultados como promedio $\pm$ desviación estándar. Los cálculos se realizaron mediante la Ec (2) y Ec (3).

$$\%SV = \frac{P_{total} - P_{volátil}}{P_{total} - P_{crisol}} * 100 \quad (2)$$

$$\%CZ = \frac{P_{volátil} - P_{crisol}}{P_{total} - P_{crisol}} * 100 \quad (3)$$

3. Potencial metanogénico de la semilla desgrasada de Chile

La BSD obtenida tras la extracción de aceite fue utilizada como sustrato en reactores de vidrio tipo batch para la producción de biogás por digestión anaerobia. Los biorreactores, con capacidad de 60 ml fueron sellados herméticamente con tapas de aluminio con empaques de politetrafluoroetileno (PTFE) que permitió la punción de los reactores para mediciones.

Se trabajó con una proporción inóculo:sustrato de 2:1, utilizando 35 ml de mezcla por reactor [10]. La digestión anaerobia se llevó a cabo a una temperatura controlada de $37 \pm 1^\circ\text{C}$, durante un periodo de 46 días. Para asegurar una mezcla uniforme del sustrato e inóculo, los reactores fueron agitados de manera continua a 150 rpm en una incubadora CScientific CVP-500 [13, 14].

La medición de la producción de biogás se realizó midiendo la presión dentro del espacio de cabeza del reactor con un manómetro digital, mientras que el contenido de metano se analizó mediante eudiometría empleando NaOH (1N) para el desplazamiento de gas. Además, se utilizaron reactores que contenían únicamente inóculo (blancos) con el objetivo de determinar la producción endógena de metano y ajustar los valores obtenidos en los biorreactores con mezcla de sustrato e inóculo [13].

Para la carga de los biorreactores se utilizó la Ec (4).

$$gSV = \frac{vol}{m}(ST)(SV) \quad (4)$$

Se realizaron pruebas estadísticas utilizando el software SigmaPlot versión 14®, para las producciones acumuladas de metano ($\text{ml CH}_4 \text{ gSV}^{-1}$). Se analizó la homocedasticidad de los datos mediante la prueba de igualdad de varianzas y se hicieron las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk. Posteriormente se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), seguido de la prueba de Tukey considerando un nivel de significancia de $p < 0.05$.

C. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Extracción de aceite

El porcentaje de aceite extraído de la semilla de Chile mirasol fue de $12.75 \% \pm 1.16$. Los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango de lo que se ha reportado previamente por otros autores, donde se menciona que el aceite representa entre 9.0 % y 32.6 % del peso de las semillas de Chile verde, dependiendo de la variedad [10, 15, 16].

En comparación, estudios respecto a semillas de Chile rojo han informado valores superiores respecto al contenido de aceite, cercanos al 27 % en las variedades Podravka y Slavonka [16], mientras que otras investigaciones el contenido de aceite reportado se encuentra entre el 20 y 30 % dependiendo de la variedad y el método de extracción [17].

Respecto a la composición, aunque en el presente trabajo no se analizó el perfil de ácidos grasos del material en estudio, se ha reportado que el ácido linoleico (C18:2) generalmente es el predominante en aceites de semilla de Chile, con valores entre el 70 y 78 % del contenido de lípidos en total, seguido por el ácido oleico (C18:1) con una presencia del 8 al 12 %, y en menor proporción los ácidos saturados palmítico (C16:0) y esteárico (C18:0), con valores del 10 al 16 % y 2 al 4 % [16, 17]. Este perfil rico en poliinsaturados ha sido reportado de manera firme en distintos estudios lo que respalda el potencial de estas semillas como materia prima para la producción de biodiésel mediante transesterificación [15, 16, 17].

Sin embargo, a pesar del potencial químico y funcional que presentan las semillas para generación de biodiesel, actualmente no se registra un aprovechamiento industrial significativo en este sentido. La mayoría de estos subproductos continúan siendo descartados o utilizados en aplicaciones de bajo valor.

2. Determinación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y cenizas (CZ).

Los resultados respecto a los análisis de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y contenido de cenizas (CZ) se muestran en la [Tabla I](#).

Para la BSD se determinó que el porcentaje de ST fue de $94.62 \pm 0.35 \%$, lo cual indica un bajo contenido de humedad. En cuanto a los SV, se determinó un valor de $95.13 \pm 0.35 \%$, lo que resulta relevante, ya que este parámetro refleja la porción de materia orgánica disponible para su transformación en metano. Estos resultados muestran que la biomasa desgrasada de semilla de Chile guajillo posee muy poca humedad y un alto contenido de material potencialmente aprovechable, lo cual es favorable en la biomasa seleccionada como sustrato para el proceso de digestión anaerobia y producción de biogás [13, 14].

TABLA I. CARACTERIZACIÓN DE INÓCULOS Y SUSTRATOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS METANOGÉNICAS.

Material	ST (%)	SV (% de ST)	H (%)	CZ (% de ST)
BSD	94.62 ± 0.35	95.13 ± 0.04	6.31 ± 0.06	4.86 ± 0.04
Ino T	1.86 ± 0.32	77.66 ± 2.69	98.13 ± 0.32	22.33 ± 2.69
Ino P	11.09 ± 0.39	30.71 ± 0.45	88.90 ± 0.39	69.29 ± 0.45
Ino B	9.51 ± 0.10	56.43 ± 0.39	90.49 ± 0.10	43.56 ± 0.39

*Cada valor es un promedio de triplicado ± desviación estándar. ST= sólidos totales, SV = sólidos volátiles, H = humedad, CZ = cenizas, BSD = biomasa de semilla desgrasada, Ino T= inóculo tostadas, Ino P= inóculo pacífico, Ino B= inóculo beagaia.

3. Potencial metanogénico de la biomasa de semilla desgrasada.

Los biorreactores tuvieron un tiempo de retención hidráulica de 46 días. En todos los tratamientos se mostró una fase acelerada de producción de biogás al inicio de la digestión anaerobia, seguida de una disminución progresiva de la producción hasta llegar a una fase estacionaria al final del experimento. Las curvas mostradas incluyen promedios de producción acumulada de metano por gramo de sólido volátil añadido al reactor (ml CH₄ gSV⁻¹) con barras de desviación estándar (±SD) que indican la variabilidad entre réplicas. Los tres inóculos (B, P y T) mostraron resultados bastante significativos en cuanto a la producción de biogás (Tabla II).

En la Fig. 1 se muestra la producción acumulada de metano (CH₄) expresada como ml CH₄ gSV⁻¹, donde el inóculo T mostró el mejor desempeño metanogénico entre los tres tratamientos ya que la producción de metano fue significativamente más alta desde los primeros días, superando los 450 ml CH₄ gSV⁻¹ antes del día 15. La producción acumulada alcanzó un valor máximo 774.49 ± 22.77 ml CH₄ g SV⁻¹ al final del experimento.

El inóculo BeGaia tuvo una producción rápida durante los primeros 15 días del experimento y alcanzó una producción de más de 300 ml CH₄ g SV⁻¹. Posteriormente, la producción de biogás disminuyó y se estabilizó hacia el día 30 con una producción acumulada final de 435.03 ± 14.33 ml CH₄ g SV⁻¹.

TABLA II. PRODUCCIÓN ACUMULADA DE METANO (CH₄) EXPERIMENTAL.

Tratamiento	Producción acumulada (ml CH ₄ /gSV)
T + BSD	774.49 ± 22.77 ^a
B + BSD	435.03 ± 14.33 ^b
P + BSD	449.06 ± 18.67 ^b

Letras diferentes representan diferencias estadísticas para los datos en la columna (n=3, Tukey P≤0.05). Donde: BSD: Biomasa de semilla desgrasada; T: inóculo tostadas blancas; B: inóculo BeGaia; P: inóculo Cervecería Pacífico; mL CH₄/gSV: Mililitros de metano por gramo de sólido volátil añadido al reactor.

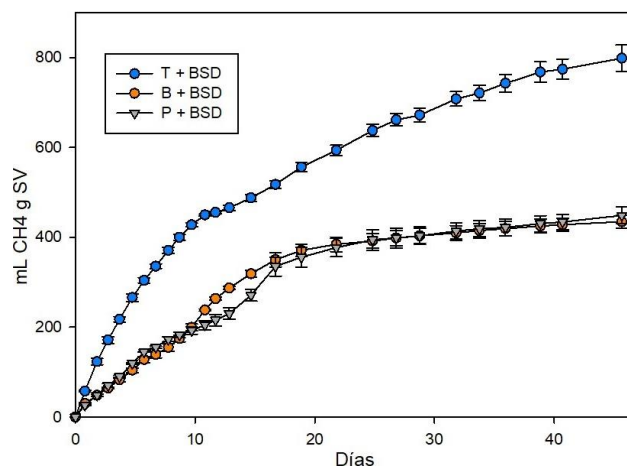


Fig. 1. Comparación de la producción acumulada de metano de semilla desgrasada de Chile mirasol con los diferentes inóculos

Respecto al tratamiento inóculo de Cervecería Pacífico, este presentó una producción más lenta en las primeras etapas. Sin embargo, a partir del día 12 existió un aumento en la producción. La producción final fue de 449.06 ± 18.67 ml CH₄ g SV⁻¹, similar a la obtenida con el inóculo BeGaia, aunque con una fase de adaptación más prolongada.

Estos resultados muestran que el inóculo T fue el más eficiente para el proceso de digestión anaerobia de la semilla desgrasada de Chile guajillo. Con este inóculo se obtuvo cerca del doble de la producción de metano en comparación con los inóculos B y P. Esta diferencia sugiere una mayor adaptación o actividad metanogénica del consorcio microbiano presente en el inóculo T, lo cual podría estar relacionado con su origen o historial previo de uso en este tipo de bioprocesos.

El análisis estadístico (ANOVA de una vía) demostró diferencias significativas entre los tratamientos (F = 267.83, p < 0.001). Las pruebas estadísticas indicaron que el inóculo T presentó una producción de metano significativamente mayor que los inóculos B y P (p < 0.001), mientras que no se observaron diferencias significativas entre estos dos últimos (p = 0.724). Estos resultados respaldan que el inóculo T tiene un desempeño metanogénico superior en las condiciones evaluadas.

Por otro lado, el porcentaje de metano presente en el biogás generado para cada experimento fue el siguiente: para T + BSD se obtuvo 61.80 ± 2.01%, para B + BSD se alcanzó 62.65 ± 3.72% y finalmente para P + BSD se reportó 70.18 ± 6.01%. Cabe mencionar que, aunque el inóculo de Cervecería Pacífico no alcanzó la mayor producción acumulada de metano, presentó un biogás con mayor calidad, lo que puede relacionarse a que posiblemente la etapa metanogénica de la digestión anaerobia pudo ocurrir con más estabilidad [12,18,19].

En comparación, los resultados obtenidos de la producción acumulada de metano del presente trabajo fueron superiores a los reportados por Lezama-Rosas [19] donde utilizando semillas desgrasadas de Chile poblano reportaron

valores entre 238 y 417 ml CH₄ gSV⁻¹. En la búsqueda de literatura realizada se observó escasos estudios sobre el aprovechamiento de semillas de Chile para la producción de biogás, por lo que los resultados obtenidos se comparan favorablemente con los obtenidos a partir de otros subproductos oleaginosos conocidos como "oil cakes", que son los residuos sólidos que quedan después de la extracción del aceite.

Por ejemplo, el residuo desgrasado de girasol tiene un potencial metanogénico que oscila entre 186 y 215 mL de CH₄/gSV. Incluso con un pretratamiento complejo (uso de ácido sulfúrico y alta temperatura), su rendimiento máximo apenas alcanzó los 302 mL de CH₄/gSV [20, 21]. También, se ha reportado que la fermentación en estado sólido del sobrante de palma produce un rendimiento de aproximadamente 130 mL de CH₄/gSV [21, 22].

Estos datos demuestran que el potencial metanogénico de la biomasa desgrasada de Chile mirasol es significativamente superior al de diferentes residuos o subproductos oleaginosos. Este hecho resalta el alto valor de este subproducto agrícola y la ventaja de no requerir de pretratamientos complejos para su valorización energética, lo que lo posiciona en una materia prima ideal para la producción de biogás de manera eficiente.

III. CONCLUSIONES

El presente trabajo realizado mostró que las semillas de Chile guajillo representan un recurso agroindustrial altamente aprovechable bajo un enfoque de biorrefinería. El porcentaje de aceite que se obtuvo se encuentra dentro de los rangos reportados por la literatura para distintas variedades de *Capsicum*. De esta manera, la abundancia de este residuo y su porcentaje de contenido de aceite respalda su uso como materia prima para la producción de biocombustibles líquidos, particularmente biodiésel. Aunque no se profundizó en la caracterización del perfil de ácidos grasos, la evidencia existente señala que este tipo de aceites presenta un alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados, lo que da soporte a la congruencia de su estudio para aplicaciones energéticas.

Se determinó que la biomasa residual desgrasada contiene una fracción elevada de sólidos totales y sólidos volátiles, lo cual muestra una porción orgánica abundante y disponible para su transformación a biometano. Esta característica se reflejó en los ensayos de digestión anaerobia, donde se alcanzaron producciones relevantes de metano. De los tres tratamientos, el inóculo Tostaditas (T) fue el que mostró un desempeño significativamente superior en comparación con los inóculos BeGaia (B) y Pacífico (P), esto implica que la composición y las características de los inóculos son puntos importantes a considerar para la eficiencia del proceso metanogénico.

Los resultados obtenidos muestran la importancia y viabilidad de establecer esquemas de aprovechamiento integral en el que la fracción lipídica y la fracción sólida de las semillas de Chile guajillo puedan ser valorizadas mediante la producción secuencial de biocombustibles, tales como el biodiésel y biogás. Este enfoque representa una alternativa para el manejo sustentable de residuos agroindustriales y abre la posibilidad de generar cadenas de obtención de productos de valor con un impacto ambiental positivo.

Como recomendación, se menciona que, para otorgar mayor soporte a este tipo de estudios en el futuro, se incluya la caracterización de los lípidos obtenidos (perfil de ácidos grasos, índice de saponificación y estabilidad oxidativa), así como la evaluación de la digestión anaerobia a nivel piloto bajo distintas condiciones de operación. Estos aspectos serán de gran importancia para evaluar la capacidad de adaptación del proceso en diferentes escalas y consolidar el modelo de biorrefinería propuesto como una opción atractiva para la industria agroalimentaria y energética.

REFERENCIAS

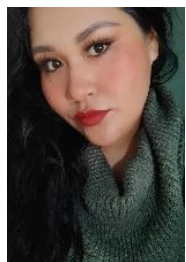
- [1] A. R. Alcántara-Revilla, A. Mejía-Benavides, S. C. Chávez-García, and D. E. Castillo-Llerena, "Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su impacto en el medio ambiente," *Rev. Cient. OGOLL*, vol. 2, no. 2, e29, 2022.
- [2] I. Prado-Acebo, J. Cubero-Cardoso, T. A. Lu-Chau, y G. Eibes, "Integral multi-valorization of agro-industrial wastes: A review," *Waste Management*, vol. 183, pp. 42-52, May 2024. DOI: 10.1016/j.wasman.2024.05.001
- [3] R. Singh, R. Das, S. Sangwan, et al., "Utilisation of agro-industrial waste for sustainable green production: a review," *Environmental Sustainability*, vol. 4, pp. 619-636, Dec. 2021. DOI: 10.1007/s42398-021-00200-x.
- [4] B. Koul, M. Yakoob, y M. P. Shah, "Agricultural waste management strategies for environmental sustainability," *Environmental Research*, vol. 206, p. 112285, Feb. 2022. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112285.
- [5] E. Capanoglu, E. Nemli, y F. Tomas-Barberan, "Novel approaches in the valorization of agricultural wastes and their applications," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 70, no. 23, pp. 6787-6804, Jun. 2022. DOI: 10.1021/acs.jafc.1c07104
- [6] A. C. F. Carvalho, S. Ghosh, T. G. Hoffmann, E. S. Prudêncio, C. K. de Souza, y S. Roy, "Valuing agro-industrial waste in the development of sustainable food packaging based on the system of a circular bioeconomy: A review," *Cleaner Waste Systems*, p. 100275, Jan. 2025. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100275.
- [7] S. K. Maity, "Opportunities, recent trends and challenges of integrated biorefinery: Part I," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 1427-1445, Mar. 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.092.
- [8] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), "Panorama agroalimentario 2018-2024: Chile verde," Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>
- [9] Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), "El Chile como parte de la cultura alimenticia de México," CIAD.mx, 2020. [Online]. Available: <https://www.ciad.mx/el-chile-como-parte-de-la-cultura-alimenticia-de-mexico/>.
- [10] T. Cvetković, J. Ranilović, y S. Jokić, "Quality of pepper seed by-products: A review," *Foods*, vol. 11, no. 5, p. 748, Mar. 2022. DOI: 10.3390/foods11050748.
- [11] EPA. Environmental Protection Agency, "Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solid, and Biosolids Draft," EPA-821-R-01-015, Jan., 2001.
- [12] B. Armenta-Medel, J. G. Lezama-Rosas, M. F. Juárez-Cota, D. U. Santos-Ballardo, and D. L. Ambríz-Pérez, "Potencial de obtención de biodiesel y biogás a partir de semilla de guamúchil (*Pithecellobium dulce*)," *Identid. Energética*, vol. 7, no. 1, pp. 43-47, 2023.

- [13] D. U. Santos-Ballardo, X. Font-Segura, A. S. Ferrer, R. Barrena, S. Rossi, y A. Valdez-Ortiz, "Valorisation of biodiesel production wastes: Anaerobic digestion of residual Tetraselmis suecica biomass and co-digestion with glycerol," *Waste Management & Research*, vol. 33, no. 3, pp. 250-257, Mar. 2015. DOI: 10.1177/0734242X15572182.
- [14] J. C. Velarde-Meza, L. J. Tiznado-Osuna, Y. M. Aguilera-Hernández, y D. U. Santos-Ballardo, "Producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de mango Ataulfo y heces caninas," *Identidad Energética*, vol. 6, no. 1, pp. 31-37, Jan. 2023.
- [15] J. Lee, J. Kim, Y. S. Ok, y E. E. Kwon, "Rapid biodiesel synthesis from waste pepper seeds without lipid isolation step," *Bioresource Technology*, vol. 239, pp. 17-20, Jul. 2017. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.011.
- [16] T. Cvetković, J. Ranilović, D. Gajari, H. Tomić-Obrdaj, D. Šubarić, T. Moslavac, et al., "Podravka and slavonska varieties of pepper seeds (*Capsicum annum* L.) as a new source of highly nutritional edible oil," *Foods*, vol. 9, no. 9, p. 1262, Sep. 2020. DOI: 10.3390/foods9091262.
- [17] M. Chouaibi, L. Rezig, S. Hamdi, y G. Ferrari, "Chemical characteristics and compositions of red pepper seed oils extracted by different methods," *Industrial Crops and Products*, vol. 128, pp. 363-370, Mar. 2019. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.11.030.
- [18] K. A. P. Regalado, J. E. V. Ontiveros, M. F. J. Cota, D. L. A. Pérez, and D. U. S. Ballardo, "Biorrefinería energética a partir de semilla residual de aguacate (*Persea americana* cv. 'Hass')," *QUIBIUAS Rev. Cienc. Quím. Biol.*, no. 2, pp. 23-34, 2024.
- [19] J.G. Lezama-Rosas, B. Armenta-Medel, M.F. Juárez-Cota, D.A. Ambríz-Pérez, D.U. Santos-Ballardo, "Potencial Bioenergético de residuos agroindustriales de Chile poblano (*Capsicum annum* variedad poblano). Memorias de Congreso Cienergía UG 2023. 69-73.
- [20] F. Monlau, E. Latrille, A. C. Da Costa, J. P. Steyer y H. Carrère, "Enhancement of methane production from sunflower oil cakes by dilute acid pretreatment," *Applied Energy*, vol. 102, pp. 1105-1113, Feb. 2013. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.06.042.
- [21] A. Mohanty, P. R. Rout, B. Dubey, S. S. Meena, P. Pal y M. Goel, "A critical review on biogas production from edible and non-edible oil cakes," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 12, núm. 3, pp. 949-966, Mar. 2022. DOI: 10.1007/s13399-021-01292-5.
- [22] S. Chaikitkaew, P. Kongjan y O. Sompong, "Biogas production from biomass residues of palm oil mill by solid state anaerobic digestion," *Energy Procedia*, vol. 79, pp. 838-844, Nov. 2015. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.575.

BIOGRAFÍAS



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 artículos 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.



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 niñas y jóvenes mujeres para promover el interés y la participación en carreras tecnológicas y científicas. Miembro del SDG Student Hub de la UAEMex, voluntaria en diversas organizaciones ambientalistas y proyectos de impacto socioambiental en gobierno municipal.



GABRIELA AGUILAR-ZÁRATE Ingeniera Bioquímica en Recursos Acuáticos con Maestría en Ciencias. Investigadora Asociada en el Centro de Investigación en alimentación y Desarrollo A.C. subselección Mazatlán. Autora de publicaciones científicas. Colaboración en la como asesora de tesis de licenciatura y maestría e impartición de cursos. Participación en el desarrollo de proyectos de Investigación en Ecotoxicología y Procesamiento de residuos para obtener productos de valor. Experiencia en Bioquímica, principalmente análisis de plaguicidas por Cromatografía de gases.



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



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 (SNI) 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.