

Valorización bioenergética de residuos del beneficiado húmedo de café mediante digestión anaerobia

Noemí Nava-Valente ^{1,*}, Daniel Simón Olivo-Alanís ¹, Noé Luiz-Santos ¹, Luis Antonio López-Escobar ² y Eduardo Hernández Aguilar ³

¹ Centro de Investigación y Asistencia en tecnología y Diseño del estado de Jalisco, Subsede Noreste, Vía de la Innovación #404, Autopista Mty-Aeropuerto Km. 10 Parque PIIT, C.P. 66628, Apodaca, Nuevo León, México.

² Universidad Politécnica de Huatusco, Calle 22 Sur S/N Col. Reserva Territorial, 94106 Huatusco, Veracruz, México.

³ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana Campus Orizaba, Oriente 6 No. 1009 Colonia Rafael Alvarado, Orizaba 94340, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: nnava@ciatej.mx

Energías Renovables (Waste to Energy)

Recibido: 22 de agosto de 2025 Aceptado: 2 de octubre de 2025 Publicado: 16 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.607>

Resumen: El café es uno de los principales productos agroindustriales a nivel mundial y su procesamiento genera residuos sólidos y líquidos con elevada carga orgánica y potencial contaminante, como la pulpa y las aguas residuales del beneficiado húmedo. La valorización de estos subproductos mediante digestión anaerobia representa una estrategia alineada con la economía circular, al permitir la generación de bioenergía y la mitigación de impactos ambientales. En este estudio se evaluó la producción de metano a partir de pulpa de café y agua residual del proceso de beneficiado, mediante ensayos en operación batch. Los sistemas fueron monitoreados durante su fase de estabilización considerando parámetros de pH, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos volátiles (SV) y producción acumulada de metano. Asimismo, se analizaron indicadores de eficiencia y se estimó el potencial energético de ambos sustratos en términos de energía térmica y eléctrica, considerando un poder calorífico de 50 MJ/m³ para CH₄ y una eficiencia de conversión eléctrica del 30%. Los resultados mostraron diferencias claras entre ambos residuos. En la pulpa de café, la remoción de DQO y SV alcanzó 36.23% y 38.7%, respectivamente, con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 21 días y una producción acumulada de metano de 1.19 L en condiciones estándar de presión y temperatura. En contraste, el agua residual presentó menores remociones (18.4% de DQO y 20% de SV), un TRH de 5.4 días y un volumen de metano de 0.30 L. En términos energéticos, la pulpa mostró mayor potencial para cogeneración eléctrica (31 MJ/m³), mientras que el agua residual destacó en la fracción térmica (133 MJ/m³), lo que sugiere su aprovechamiento directo en procesos de secado de café. Estos hallazgos evidencian la viabilidad de integrar ambos sustratos en esquemas de valorización energética diferenciada, fortaleciendo la sostenibilidad de la cadena productiva del café mediante el uso eficiente de sus residuos.

Palabras clave: Aguas residuales; Bioenergía; Café; Digestión anaerobia; Pulpa de café

Bioenergy valorization of coffee wet processing wastes through anaerobic digestion

Abstract: Coffee is recognized as one of the main agro-industrial products worldwide, and its processing is associated with the generation of solid and liquid residues with high organic load and polluting potential, such as pulp and wastewater from wet processing. The valorization of these by-products through anaerobic digestion is regarded as a strategy aligned with the circular economy, as it enables bioenergy generation and the mitigation of environmental impacts. In this study, methane production from coffee pulp and wastewater from wet processing was evaluated through batch assays. The systems were monitored during the stabilization phase by measuring pH, chemical oxygen demand (COD), volatile solids (VS), and cumulative methane production. Efficiency indicators were also analyzed, and the energy potential of both substrates was estimated in terms of thermal and electrical energy, considering a calorific value of 50 MJ/m³ for CH₄ and an electrical conversion efficiency of 30%. The results showed clear differences between the two residues. In coffee pulp, COD and VS removals of 36.23% and 38.7%, respectively, were achieved, with a hydraulic retention time (HRT) of 21 days and cumulative methane production of 1.19 L under standard temperature and pressure conditions. In contrast, wastewater exhibited lower removals (18.4% COD and 20% VS), an HRT of 5.4 days, and a methane volume of 0.30 L. In energy terms, coffee pulp presented a higher potential for electricity cogeneration (31 MJ/m³), whereas wastewater stood out for its thermal fraction (133 MJ/m³), suggesting its direct utilization in coffee drying processes. These findings demonstrate the feasibility of integrating both substrates into differentiated energy valorization schemes, thereby strengthening the sustainability of the coffee production chain through the efficient use of its wastes.

Keywords: Wastewater; Bioenergy; Coffee; Anaerobic digestion; Coffee pulp

Introducción

El café es uno de los principales productos básicos comercializados internacionalmente y representa el segundo producto agroindustrial de mayor valor en el mercado. Su consumo ha aumentado de forma sostenida en las últimas décadas, alcanzando 10,620 millones de kg en 2024 (International Coffee Organization, 2024), y se proyecta un incremento anual del 3 % para satisfacer la demanda prevista. Este crecimiento depende en gran medida de la producción a pequeña escala, dado que aproximadamente el 70 % del café mundial es cultivado por más de 25 millones de pequeños caficultores (Acosta-Alba *et al.*, 2020).

Este aumento en el consumo se vincula también con el auge de una cultura cafetera que resalta no sólo su valor social y gastronómico, sino también sus propiedades funcionales y beneficios potenciales para la salud (Hu *et al.*, 2023). En consecuencia, la calidad integral del producto ha cobrado mayor relevancia y está determinada por múltiples factores, que abarcan desde las prácticas agrícolas y las condiciones agroecológicas hasta los métodos de procesamiento, el tostado, la molienda, la preparación y las preferencias del consumidor. Todos estos elementos interactúan y afectan significativamente las características sensoriales y nutracéuticas del café (Freitas *et al.*, 2024).

En este contexto, el método de procesamiento postcosecha adquiere especial relevancia, pues influye tanto en la calidad del grano como en el volumen y tipo de subproductos generados. Los dos métodos predominantes son el procesamiento seco y el húmedo. En el primero, las cerezas se secan al sol con toda su pulpa y, una vez deshidratadas, se retiran la cáscara, el pergamino y la piel plateada. Se trata de un método de bajo costo, dependiente del clima, que suele producir perfiles de sabor más intensos y afrutados. En el segundo, se remueven mecánicamente la cáscara y la pulpa, seguido de una fermentación microbiana para eliminar el mucílago y un posterior lavado y secado del grano. Este método produce cafés con perfiles más limpios y ácidos, aunque conlleva un mayor consumo de agua y requiere un control más estricto. Variantes como el despulpado natural (que conserva el mucílago durante el secado para acentuar notas dulces) y el semi-lavado (que lo elimina por fricción mecánica) buscan optimizar el balance entre atributos sensoriales y eficiencia del proceso (Arya *et al.*, 2022).

Ambos métodos generan grandes volúmenes de residuos orgánicos, estimados en más de diez millones de toneladas anuales (Serna-Jiménez *et al.*, 2022), entre ellos cáscara, hojas, ramas, frutos verdes, pulpa, mucílago, pergamino y cascarilla. En el beneficiado húmedo se añaden aguas residuales con alta carga orgánica y biodegradable. Tradicionalmente, estos residuos se almacenan o se emplean como fertilizantes, un aprovechamiento que no maximiza su potencial (Czekala *et al.*, 2023; Rahmah *et al.*, 2023).

La pulpa de café, principal residuo sólido del beneficiado húmedo, es un material heterogéneo compuesto por el exocarpio y mesocarpio de las cerezas, junto con granos atrapados. Presenta alto contenido de humedad, pH ácido y concentraciones elevadas de carbohidratos, proteínas, lignina y compuestos fenólicos. Su aprovechamiento convencional como fertilizante, compost o alimento para ganado ha mostrado limitaciones debido a la presencia de compuestos antioxidantes, antinutricionales y fitotóxicos como fenólicos, taninos y cafeína (Tsigkou *et al.*, 2025; López-Escobar *et al.*, 2025).

Por su parte, las aguas residuales del beneficiado húmedo pueden variar en volumen y composición según la tecnología y la cantidad de agua utilizada, que en pequeñas empresas oscila entre 2.3 y 23 m³ por tonelada de café procesado (Alemayehu *et al.*, 2020). Estas aguas, empleadas en la despulpa, fermentación y lavado, se caracterizan por un alto contenido orgánico, nutrientes y pH ácido, lo que las convierte en un efluente altamente contaminante. Aunque no existen directrices específicas para su gestión, se han explorado alternativas para su tratamiento, manejo y valorización, siendo clave evaluar su composición para seleccionar la estrategia más adecuada (Tsigkou *et al.*, 2025).

Dada su riqueza en materia orgánica, tanto la pulpa como las aguas residuales constituyen biomasa susceptible de valorización mediante procesos biológicos. Entre ellos, la digestión anaerobia se presenta como una opción versátil, capaz de tratar residuos sólidos y líquidos, y generar simultáneamente biogás (principalmente metano), ofreciendo un doble propósito: mitigación del impacto ambiental y producción de biocombustibles gaseosos (Nava-Valente *et al.*, 2023).

En los últimos años se han propuesto diversas estrategias para la valorización de los residuos generados en el beneficiado húmedo del café. Por ejemplo, el uso de celdas de combustible microbianas (MFC) con aguas residuales de este proceso demostró que las comunidades microbianas nativas pueden remover hasta un 70 % de la materia orgánica y generar voltajes cercanos a 400 mV, lo que confirma su potencial como sistemas de biorremediación y cogeneración eléctrica (Erazo *et al.*, 2023). De manera complementaria, estudios con diseños factoriales en MFC de cátodo abierto evidenciaron que el origen del inóculo influye significativamente en el desempeño electrogénico, alcanzando densidades de potencia de 300–900 mW·m⁻² y tasas de degradación de 500–600 mg·L⁻¹·día⁻¹, lo que valida su viabilidad para tratar efluentes agrícolas en zonas cafetaleras (Agudelo-Escobar *et al.*, 2022). En el caso de residuos sólidos, la pulpa de café ha sido objeto de digestión anaerobia tras pretratamientos térmicos y ácidos, donde el tratamiento a 90 °C favoreció la hidrólisis, redujo el tiempo de retención hidráulica de 21 a 15 días y elevó el rendimiento de biogás hasta un 79.8 % de metano, destacando el papel de los pretratamientos en la optimización de procesos bioenergéticos (Nava-Valente *et al.*, 2023).

Por todo lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial energético de los residuos sólidos y líquidos del procesamiento húmedo de café mediante digestión anaerobia.

Materiales y Métodos

Muestreo, acondicionamiento y caracterización de pulpa de café

La pulpa de café, compuesta por la cáscara y el mesocarpo del grano, se obtuvo semanalmente durante la temporada de cosecha en una planta procesadora situada en el municipio de Huatusco, Veracruz, México. El material fue recolectado directamente desde la despulpadora durante el beneficio húmedo y trasladado el mismo día al laboratorio en bolsas de plástico. Para su acondicionamiento, la pulpa se distribuyó en capas delgadas y se cubrió con una lámina plástica transparente, exponiéndola a secado solar durante 3–4 días, aproximadamente 5 horas diarias (11:00–16:00 h), con remoción periódica para favorecer un secado homogéneo (Nava-Valente *et al.*, 2023). Posteriormente, el material seco se sometió a reducción de tamaño hasta permitir su paso por tamiz de 1 mm este procedimiento buscó maximizar el área superficial disponible para la adsorción del sustrato, optimizando la actividad microbiana anaerobia y, en consecuencia, la generación de biogás. Para facilitar la manipulación y evitar posteriores obstrucciones en las tuberías durante el proceso de digestión anaerobia, las muestras se diluyeron con agua corriente hasta alcanzar una concentración de sólidos totales de entre el 3 % y el 5 %. Las muestras se refrigeraron a 4 °C para su posterior caracterización física y química. Las muestras de pulpa de café fueron caracterizadas en términos de pH, demanda química de Oxígeno (total y soluble), Sólidos totales, sólidos volátiles, carbohidratos y fenoles.

Muestreo y caracterización de aguas residuales

Se empleó agua residual generada durante el proceso de beneficiado húmedo de café, recolectada en una planta ubicada en la zona central del municipio de Huatusco, Veracruz. El muestreo se efectuó específicamente en la etapa de lavado posterior a la operación de la desmucilaginadora mecánica. Las muestras se obtuvieron en recipientes de plástico con capacidad de 1 L, previamente esterilizados, y se transportaron bajo condiciones de refrigeración (4±2°C) hasta el laboratorio. Posteriormente, se almacenaron en refrigeración controlada (2–8°C) hasta su análisis, con el fin de preservar sus características fisicoquímicas y microbiológicas. Los muestreos se realizaron semanalmente durante cuatro meses durante la época de cosecha de café. Las muestras de agua residual fueron caracterizadas en términos de pH, demanda química de Oxígeno (total y soluble), Sólidos totales, sólidos volátiles, carbohidratos y fenoles.

Digestión anaerobia de la pulpa de café

Se realizaron pruebas digestión anaerobia en lote para muestras de pulpa de café cruda, se emplearon reactores anaerobios escala laboratorio con una capacidad de 500 mL y un volumen de trabajo de 400 mL, cargados con 60 % de pulpa de café (sustrato) y 40 % de lodo anaeróbico (inóculo). La relación sustrato/inóculo (S/I) se determinó en pruebas exploratorias previas, las cuales no se incluyen en este trabajo (Nava-Valente *et al.*, 2023); sin embargo, se demostró que esta relación S/I permitió un comportamiento aceptable en las pruebas de BMP y una capacidad de carga adecuada del proceso. Los experimentos se realizaron por triplicado.

El inóculo de obtuvo del exceso de biomasa de un tratamiento anaerobio para el tratamiento de aguas residuales, el cual tiene 8.08% de Sólidos Suspensos Volátiles (SSV), pH=6.80. Se ajustó el valor de pH de la pulpa de café a valores cercanos a 7 mediante la adición de NaOH (40%). Posteriormente, los reactores se cerraron herméticamente y se realizó un intercambio de atmósfera con N₂ durante 3 minutos para desplazar el oxígeno y garantizar condiciones anaerobias. El volumen de metano producido se midió mediante un sistema de desplazamiento de solución de NaOH al 2%, para eliminar la presencia de CO₂ (Vanegas-Padilla *et al.*, 2023), la ejecución de la prueba en lotes se detuvo cuando la producción de metano alcanzó la fase estacionaria y el coeficiente de variación entre las tres últimas mediciones sea inferior a 5%. Los experimentos se realizaron por triplicado.

Digestión anaerobia aguas residuales

Se emplearon frascos serológicos de 120 mL, donde el inóculo utilizado proviene de un digestor anaerobio para el tratamiento de aguas residuales de cervecería, el cual tiene 8.08% de SSV. Los experimentos se realizaron por triplicado.

Se ajustó el pH del agua residual a valores cercanos a 7 mediante la adición de NaOH (40%). A continuación, se mezclaron 80 mL de agua residual con una concentración de inóculo de 1 g SSV/L. Las botellas se sellaron con tapones de teflón y tapas de aluminio, y se realizó un intercambio de atmósfera con N₂ durante 3 minutos para desplazar el oxígeno y garantizar condiciones anaerobias. Posteriormente, las botellas se colocaron en un agitador orbital (Thermo Scientific MaxQ Modelo 4314) a 120 rpm. El volumen de metano producido se midió mediante un sistema de desplazamiento de solución de NaOH al 2%, para eliminar la presencia de CO₂ (Vanegas-Padilla *et al.*, 2023), la ejecución de la prueba en lotes se detuvo cuando la producción de metano alcanzó la fase estacionaria y el coeficiente de variación entre las tres últimas mediciones sea inferior a 5%.

Métodos analíticos

La determinación de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV), Demanda Química de Oxígeno Total y Soluble (DQOt y DQOs) se realizaron según los métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales (American Public Health Association, 2017). Los ST y SV se determinaron utilizando el método 2540G. La DQOt y la DQOs se determinaron utilizando el método 5220D con un espectrofotómetro Thermo Scientific™ Genesys 20. El pH se determinó utilizando un medidor de pH Thermo Scientific™ Orion Star Modelo A1110 (4500-H+A). Los carbohidratos totales y solubles (DuBois *et al.*, 1956), y fenoles totales (Vela, 2015).

La composición del biogás se determinó mediante cromatografía de gases. Para este propósito, se utilizó un cromatógrafo de gases fuera de línea acoplado a un GC Thermo Scientific Ultra-Trace. El GC estaba equipado con una columna Heliflex AT-Q (30 m × 0.53 mm de diámetro) y un detector de conductividad térmica. Las condiciones de operación fueron las siguientes: se utilizó helio a 70 psi como gas portador, la temperatura de la columna fue de 36 °C y la del detector, de 121 °C. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

Análisis estadístico

Los datos se presentan como valor medio y se determinó la desviación estándar (±).

El análisis estadístico se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA), la diferencia entre los resultados se consideró significativa si el valor de p era inferior a 0.05, se realizó ANOVA con un nivel de confianza del 95 %. El análisis estadístico se realizó utilizando el software GraphPad Prism® Version 9.

Modelo cinético de Gompertz modificado

La estimación de los parámetros cinéticos asociados a la producción de biogás durante la digestión anaerobia se realizó mediante el ajuste de los modelos de Gompertz modificado (Ec. 1) (López-Escobar *et al.* 2025 y Méndez-Contreras *et al.* 2024).

$$G(t) = G_0 \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_{max} \cdot e}{G_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

Donde: $G(t)$ es la cantidad acumulada de metano producido en el tiempo (L); G_0 es la producción máxima de metano (L); R_{max} es la tasa máxima de producción de metano (L/h o d); λ es el tiempo de la fase de latencia (h o d).

Análisis energético

El análisis energético se evaluó mediante la siguiente ecuación:

$$E_{CH_4} = \frac{(m \cdot P_c) * 1000}{V} \cdot \eta \quad (2)$$

Donde: E_{CH_4} = Energía a partir de metano por litro de reacción; m: masa del CH₄ (kg); P_c: poder calórico del CH₄ (50 MJ/m³); V: volumen del reactor anaerobio (L); η: eficiencia del ciclo de conversión de biogás a electricidad (30%).

Para el cálculo de la energía térmica producida se emplea la Ecuación 2 sin el término de la eficiencia.

Resultados y Discusión

Caracterización de residuos sólidos y líquidos

En la tabla 1 se muestra un resumen de la caracterización fisicoquímica de la pulpa de café y el agua residual del beneficiado húmedo muestra que ambos residuos son de naturaleza marcadamente ácida (pH 5.04 y 4.00, respectivamente), con elevada carga orgánica y predominio de materia biodegradable. La pulpa presenta una DQO total de 16,920 mg/L y un 68.3% en forma soluble, sólidos totales de 53.1 g/L con fracción volátil del 81.8%, el contenido de sólidos volátiles puede atribuirse a la materia orgánica presente en la muestra, ya que, durante la incineración, de acuerdo con Miñón-Fuentes *et al.*, (2019) los productos residuales representan una fase inorgánica o mineral que no se puede volatilizar; por lo tanto, se puede inferir una alta biodegradabilidad.

Por su parte, el agua residual concentró sólidos totales de 28.71 g/L con fracción volátil del 81.1%, alto contenido de carbohidratos solubles (15,073 mg/L) y una concentración de fenoles más de tres veces superior a la de la pulpa (517.5 mg GAE/L), reflejando una alta carga contaminante pero también un potencial considerable para la recuperación de compuestos antioxidantes y su aprovechamiento en procesos fermentativos. Estos resultados evidencian que, aunque ambos residuos representan un riesgo ambiental si se descargan sin tratamiento, su composición los convierte en recursos idóneos para esquemas de valorización en economía circular, combinando extracción de compuestos de valor y procesos biotecnológicos como la digestión anaerobia para la generación de biogás.

Tabla 1. Caracterización física y química de residuos sólidos y líquidos

Parámetro/ unidad	Pulpa de café*	Agua residual*
pH	5.04 ± 0.57	4.00±0.071
DQO Total (mg/L)	16,920 ± 240	58016.66±8170.8
DQO Soluble (mg/L)	11,560 ± 130	46266.66±5424.3
Sólidos Totales (g/L)	53.1 ± 7.8	28.71±5.3
Sólidos volátiles (g/L)	43.43 ± 3.4	24.65±2.31
Carbohidratos (mg/L)	45.31 ± 3.2	15073±5074
Fenoles (mg GAE/L)	165.2±11.3	517.5±20.3

* Los datos se dan como media. ± DE, n = 3

Digestión anaerobia

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos en operación batch, la cual mostró diferencias claras entre los dos sustratos. El pH final se mantuvo en condiciones cercanas a la neutralidad en ambos casos, lo que indicó condiciones favorables para la actividad metanogénica de acuerdo con lo reportado por Moreno *et al.*, (2019) quienes afirman que el pH es

uno de los factores que afectan el proceso de digestión anaerobia, específicamente en la hidrólisis, que es la etapa limitante del proceso general, y que tiene un impacto global en la producción de biogás.

Sin embargo, los indicadores de eficiencia reflejaron contrastes importantes: la remoción de DQO fue mayor para la pulpa de café (36.23%) que en el agua residual (18.4%), lo cual se relaciona directamente con la mayor fracción de sólidos volátiles y carbohidratos disponibles en la matriz sólida. Así mismo, la remoción de sólidos volátiles alcanzó 38.7% en la pulpa, casi el doble que en el agua residual (20%). El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) influyó en el desempeño, ya que la pulpa de café requirió un TRH de 21 d, mientras que el agua residual completó el proceso en 5.4 d.

En cuanto a la producción acumulada de metano, los valores promedio fueron de 1.19 L para la pulpa de café y 0.30 L para el agua residual. Estos resultados ratifican que, aunque el agua residual puede alcanzar un equilibrio más rápido, su potencial energético es menor debido al reducido contenido de sólidos orgánicos biodegradables. Por el contrario, la pulpa de café, con un TRH más prolongado, logra una conversión de materia orgánica más eficiente y un volumen de metano más del triple en comparación con el agua residual. Esta diferencia resalta la importancia de considerar estrategias de acondicionamiento para mejorar el desempeño de las aguas residuales. En este sentido, Rivadávia *et al.* (2025) evaluaron un tratamiento físico-químico asistido (CAPT) mediante coagulación/floculación seguido de flotación por aire disuelto (C/F + DAF), encontrando que dicho pretratamiento no solo disminuyó la turbidez y los compuestos fenólicos inhibitorios, sino que también favoreció la biodegradabilidad y la producción de metano. En contraste con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde el agua residual alcanzó únicamente 0.30 L de CH₄ en batch, los valores reportados por Rivadávia *et al.* (2025) confirman que la aplicación de pretratamientos es clave para incrementar la estabilidad del proceso y potenciar el aprovechamiento energético de corrientes líquidas con elevada carga contaminante.

Tabla 2. Resumen de parámetros de digestión anaerobia en operación batch

Parámetro/ unidad	Pulpa de café*	Agua residual*
pH	6.39±0.10	6.01±0.11
Remoción de DQO (%)	36.23±1.2	18.4±3.2
Remoción SV (%)	38.7±0.15	20.01±2.4
TRH (d)	21	5.4
Volumen acumulado de CH ₄ (L)	1.19±0.13	0.300±0.24

* Los datos se dan como media. ± DE, n = 3

Parámetros cinéticos del modelo de Gompertz modificado

En la Figura 1 se presentan las curvas de producción acumulada de metano ajustadas al modelo modificado de Gompertz para (a) pulpa de café y (b) agua residual del beneficiado húmedo. En ambos casos, el modelo describió de manera adecuada la cinética de digestión anaerobia, con coeficientes de determinación elevados ($R^2 = 0.99$ para pulpa de café y 0.9965 para agua residual), lo que evidencia un buen ajuste a los datos experimentales.

Los parámetros cinéticos mostraron diferencias notables entre los sustratos (Tabla 2). La pulpa de café alcanzó un mayor volumen máximo de metano ($G_0 = 1.251$ L) respecto al agua residual ($G_0 = 0.306$ L), lo que se asocia con su mayor contenido de sólidos volátiles (43.43 g/L) y carbohidratos (45.31 mg/L), que aportan fracciones orgánicas biodegradables. En contraste, la tasa máxima de producción (R_{max}), una vez homogeneizadas las unidades, resultó más elevada en el agua residual (0.1316 L/d) que en la pulpa de café (0.0639 L/d), lo cual indicó que la fracción soluble del agua permitió una producción inicial más rápida, aunque con menor rendimiento acumulado.

El tiempo de fase lag (λ) también reforzó estas diferencias: el agua residual presentó un arranque más corto ($\lambda = 0.67$ d), mientras que en la pulpa se observó un periodo inicial de adaptación más prolongado ($\lambda = 3.17$ d). Sin embargo, la cinética del agua residual, aunque inmediata, se ve limitada por la baja densidad de sustrato biodegradable y la alta concentración de fenoles (517.5 mg GAE/L), que inhibieron parcialmente la actividad metanogénica y restringieron el volumen total alcanzado. En contraste, la pulpa de café, pese a un inicio más lento, sostiene un crecimiento más

prolongado y estable de metano gracias a su elevada carga de sólidos volátiles y carbohidratos, así como a una menor concentración de fenoles (165.2 mg GAE/L).

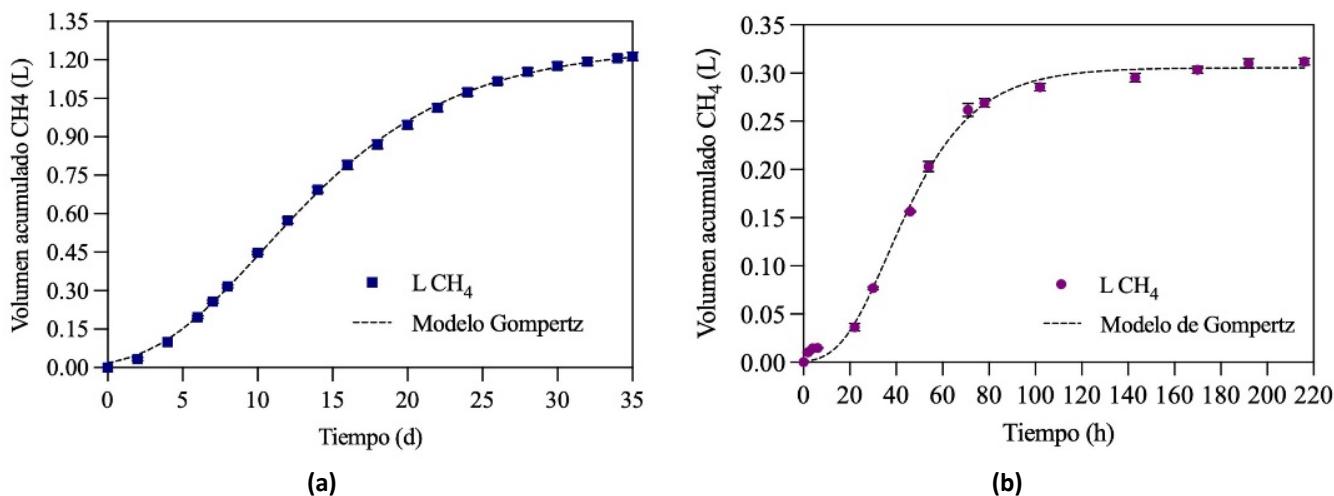


Figura 1. Producción acumulada de metano experimental y ajuste al modelo modificado de Gompertz para: a) pulpa de café y b) agua residual del beneficiado húmedo

Los parámetros cinéticos confirmaron que la pulpa sostiene tasas elevadas de metanogénesis tras la fase de adaptación, mientras que el agua residual requiere estrategias de acondicionamiento que permitan aprovechar competitivamente su potencial energético.

Estudios previos realizados por Sumardiono *et al.*, (2021) evaluaron la producción de biogás a partir de pulpa de café y plumas de pollo bajo diferentes condiciones de sólidos totales, relación C/N y pretratamiento de delignificación (NaOH, ajustando la cinética con el modelo de Gompertz. Los mejores resultados se obtuvieron con 25 % ST y una relación C/N de 25 (g/g) en combinación con delignificación, alcanzando una producción de biogás de 10,438 mL y un potencial máximo estimado de 13,498 mL, con una tasa de producción de 419 mL/d y R^2 de 0.9961. Estos valores superan ampliamente la producción observada en nuestro estudio (1.19 L ≈ 1,190 mL de metano para pulpa de café en operación batch), lo que resalta la relevancia de los pretratamientos para mejorar la biodegradabilidad de matrices lignocelulósicas y acelerar la conversión bioenergética.

Tabla 3. Resumen de parámetros cinéticos de Gompertz

Parámetro	Pulpa de café	Agua residual	Agua residual unidades normalizadas
G_0	1.25 L	0.3056 L	0.3056 L
R_{max}	0.0639 L/d	0.005482 L/h	0.1316 L/d
λ	3.173 d	16.01 h	0.667 d
R^2	0.99	0.985	0.985

Cálculo de energía

La estimación energética basada en la producción de metano y el poder calorífico del CH_4 (50 MJ/m³) permitió diferenciar el potencial de aprovechamiento de la pulpa y del agua residual del café. Los resultados mostraron que la energía térmica representó la mayor fracción recuperable en ambos casos, con valores cercanos a 106 kJ/L para pulpa y 133 kJ/L para agua residual, mientras que la energía eléctrica derivada del ciclo de conversión alcanza solo alrededor de 31 kJ/L en pulpa y 4 kJ/L en agua residual. Esta diferencia se debe a la eficiencia del proceso de conversión (30%), que limita la fracción de metano transformable en electricidad.

El contraste entre sustratos es relevante: aunque la pulpa ofrece mayor generación eléctrica relativa, el agua residual destacó por su aporte térmico superior, lo que la convierte en un insumo atractivo para aplicaciones donde el calor directo pueda ser utilizado *in situ*. En este sentido, el metano producido podría destinarse a líneas calientes relacionadas con el proceso de secado del café, particularmente en secadores rotatorios de tambor. Estos resultados sugieren que la integración de ambos sustratos podría optimizar la recuperación energética, destinando el biogás del agua residual principalmente a usos térmicos en el secado y el de la pulpa a cogeneración eléctrica, fortaleciendo así esquemas de economía circular en la agroindustria cafetalera.

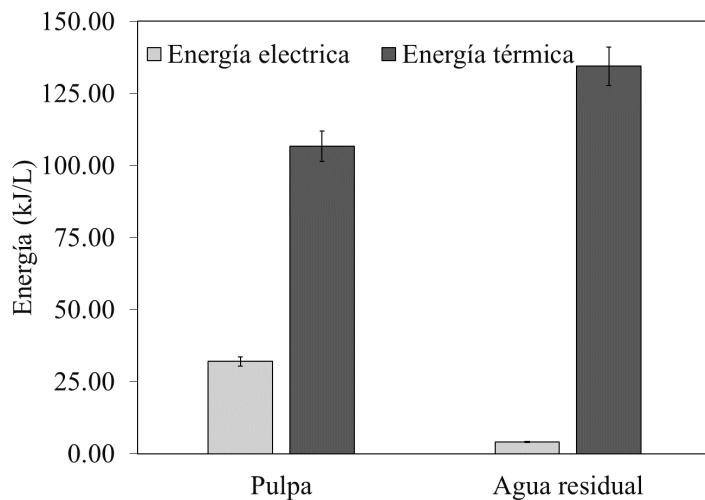


Figura 2. Estimación del aprovechamiento energético de pulpa y aguas residuales del café

Conclusiones

La caracterización comparativa de la pulpa y el agua residual del beneficiado húmedo de café evidenció contrastes relevantes en su potencial bioenergético. En condiciones de operación batch, la pulpa mostró mayor remoción de sólidos volátiles (38.7%) y DQO (36.2%), además de un mayor volumen acumulado de metano (1.19 L), atribuible a su mayor fracción de carbohidratos y compuestos orgánicos biodegradables, aunque requirió un mayor tiempo de retención hidráulica (21 días). Por su parte, el agua residual alcanzó tiempos de estabilización más cortos (5.4 días), con menor conversión de materia orgánica, pero con un aporte energético térmico superior al destinarse a aplicaciones directas de calor.

La estimación energética, basada en el poder calorífico del CH₄, permitió diferenciar las aplicaciones potenciales: la pulpa como insumo más favorable para cogeneración eléctrica, mientras que el agua residual para aprovechamiento térmico *in situ*, particularmente en procesos industriales de secado de café. Esta complementariedad constituye una aportación novedosa, al proponer un esquema dual de valorización que optimiza el uso de ambos subproductos bajo un enfoque de economía circular. En conjunto, los resultados confirman la viabilidad técnica de integrar residuos sólidos y líquidos del proceso de beneficiado de café en sistemas de digestión anaerobia, contribuyendo tanto a la reducción de la carga contaminante como a la generación sostenible de energía renovable.

Agradecimientos y financiamiento: Los autores expresan su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el financiamiento del proyecto de Maduración de tecnologías, mejoramiento de la inventiva y retos tecnológicos para la atención de problemáticas nacionales prioritarias. Categoría A. Proyectos para la maduración de tecnologías y mejoramiento de la inventiva orientados a la atención de problemáticas nacionales prioritarias (No. MADTEC-2025-M-189)

Bibliografía

- Acosta-Alba, I., Boissy, J., Chia, E., & Andrieu, N. (2020). Integrating diversity of smallholder coffee cropping systems in environmental analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(2), 252–266. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01689-5>
- Agudelo-Escobar, L. M., Cabrera, S. E., & Avignone Rossa, C. (2022). A bioelectrochemical system for waste degradation and energy recovery from industrial coffee wastewater. *Frontiers in Chemical Engineering*, 4, 814987. <https://doi.org/10.3389/fceng.2022.814987>

- Alemayehu, Y. A., Asfaw, S. L., & Tirfie, T. A. (2020). Management options for coffee processing wastewater: A review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(2), 454–469.
- American Public Health Association. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Arya, S. S., Venkatram, R., More, P. R., & Vijayan, P. (2022). The wastes of coffee bean processing for utilization in food: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 59(2), 429–444. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05032-5>
- Czekała, W., Łukomska, A., Pulka, J., Bojarski, W., Pochwatka, P., Kowalczyk-Juśko, A., & Dach, J. (2023). Waste-to-energy: Biogas potential of waste from coffee production and consumption. *Energy*, 276, 127604. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127604>
- DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28, 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Erazo, S., & Agudelo-Escobar, L. M. (2023). Determination of electrogenic potential and removal of organic matter from industrial coffee wastewater using a native community in a non-conventional microbial fuel cell. *Processes*, 11(2), 373. <https://doi.org/10.3390/pr11020373>
- Freitas, V. V., Borges, L. L. R., Vidigal, M. C. T. R., dos Santos, M. H., & Stringheta, P. C. (2024). Coffee: A comprehensive overview of origin, market, and the quality process. *Trends in Food Science & Technology*, 146, 104411.
- Hu, S., Gil-Ramírez, A., Martín-Trueba, M., Benítez, V., Aguilera, Y., & Martín-Cabrejas, M. A. (2023). Valorization of coffee pulp as bioactive food ingredient by sustainable extraction methodologies. *Current Research in Food Science*, 6, 100475. <https://doi.org/10.1016/j.crcs.2023.100475>
- López-Escobar, L. A., Olivo-Alanís, D. S., & Nava-Valente, N. (2025). Subproductos del café (*Coffea*): desafíos ambientales y oportunidades para la bioeconomía. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 4(1), 45–49. <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.422>
- Miñón-Fuentes, R., & Aguilar-Juárez, O. (2019). Hydrogen production from coffee pulp by dark fermentation. *Water Science and Technology*, 80(9), 1692–1701. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.416>
- Moreno, E. L., & Zapata, A. D. (2019). Biohydrogen production by codigestion of fruits and vegetable waste and coffee mucilage. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 72(3), 9007–9018.
- Nava-Valente, N., Del Ángel-Coronel, O. A., Atenodoro-Alonso, J., & López-Escobar, L. A. (2023). Effect of thermal and acid pre-treatment on increasing organic loading rate of anaerobic digestion of coffee pulp for biogas production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(6), 4817–4830. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01529-3>
- International Coffee Organization. (2024). *Paving the way for a sustainable future through coffee diplomacy*. <https://www.ico.org/documents/cv2024-25/annual-review-2023-2024-e.pdf>
- Rahmah, D. M., Mardawati, E., Kastaman, R., Pujiyanto, T., & Pramulya, R. (2023). Coffee pulp biomass utilization on coffee production and its impact on energy saving, CO₂ emission reduction, and economic value added to promote green lean practice in agriculture production. *Agronomy*, 13(3), 904. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030904>
- Rivadávia, R., Rosa, A. P., Nascimento, L. A., Rocha, D. N., Del Rei Passos, F. L., dos Santos Renato, N., & Borges, A. C. (2025). Effects of coagulation/flocculation followed by dissolved air flotation on anaerobic digestion of coffee processing wastewater. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(8), 11645–11658.
- Serna-Jiménez, J. A., Siles, J. A., de los Ángeles Martín, M., & Chica, A. F. (2022). A review on the applications of coffee waste derived from primary processing: Strategies for revalorization. *Processes*, 10(11), 2436. <https://doi.org/10.3390/pr10112436>
- Sumardiono, S., Jos, B., Dewanti, A. A. E., Mahendra, I., & Cahyono, H. (2021). Biogas production from coffee pulp and chicken feathers using liquid- and solid-state anaerobic digestions. *Energies*, 14(15), 4664. <https://doi.org/10.3390/en14154664>
- Tsigkou, K., Demissie, B. A., Hashim, S., Ghofrani-Isfahani, P., Thomas, R., Mapinga, K. F., & Angelidaki, I. (2025). Coffee processing waste: Unlocking opportunities for sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 210, 115263. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115263>
- Vanegas-Padilla, A. P., Morales-Miranda, I. J., Vega-Ochoa, M. A., Ortega-Sinning, E. R., & Vanegas-Padilla, D. L. (2023). Evaluación de la producción de biogás a partir de un biodigestor utilizando residuos orgánicos y aguas residuales generadas en la central de abastos de Valledupar. *Revista Politécnica*, 19, 9–19. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v19n37a1>
- Vela, J. C. A. (2015). Modificación del método de Folin-Ciocalteu para la determinación de fenoles totales en muestras complejas. *Revista de Análisis Químico*, 23, 123–130.