EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ COMO ESTRATEGIA DE CIERRE DE CICLO EN EL DEPARTAMENTO DEL CESAR

DENILSON RICO CARRASCAL

MARÍA ANGÉLICA VILLEGAS SANGUINO

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR, SECCIONAL AGUACHICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGROINDUSTRIALES

PROGRAMA DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

AGUACHICA, CESAR

2026

EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ COMO ESTRATEGIA DE CIERRE DE CICLO EN EL DEPARTAMENTO DEL CESAR

DENILSON RICO CARRASCAL

MARÍA ANGÉLICA VILLEGAS SANGUINO

DIRECTOR(A)

MSc. MARÍA DEL MAR PRIETO MANOSALVA

CO DIRECTOR(a)

MAG. YINA PAOLA ORTEGA SANTIAGO

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero agroindustrial

Línea de investigación:

Desarrollo y producción de biocombustibles ambientalmente sostenibles

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR, SECCIONAL AGUACHICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGROINDUSTRIALES

PROGRAMA DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

AGUACHICA, CESAR

2026

NOTA DE APROBACIÓN

El trabajo de grado de los o el Denilson Rico Carrascal, María Angélica Villegas Sanguino, titulado "Evaluación de la viabilidad técnica para la obtención de biogás a partir de residuos de café como estrategia de cierre de ciclo en el departamento del cesar", ha sido aprobado por los jurados, quien no se hace responsable de su contenido, pero lo ha encontrado correcto en su calidad y en su forma de presentación por lo que en fe de lo cual firman.

LUIS EDUARDO GALEZO GUERRA
EVALUADOR 1

JULIO CESAR SOCARRAS BALLESTA
EVALUADOR 2

MARÍA DEL MAR PRIETO MANOSALVA
DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

YINA PAOLA ORTEGA SANTIAGO
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

Tabla de contenido

RESUMEN……...……10

1. INTRODUCCIÓN..... 12

1.1. OBJETIVOS 18

1.2. MARCO TEÓRICO 19

1.2.1. La producción de biometano por medio de digestión anaerobia...... 19

1.2.2. Características fisicoquímicas de los residuos del café (pulpa, cáscara, mucílago) 20

1.2.3. Factores que influyen en la producción de biogás 20

1.2.4. Inhibidores específicos 21

1.2.5. Inhibición de proceso, mecanismos de control y estrategias de mitigación.22

1.2.6. Proceso de digestión anaerobia. 23

1.2.6.1 Hidrolisis……...……...23

1.2.6.2 Acidogénesis y acitogénesis…….……24

1.2.6.3 Metanogénesis ……..……24

1.2.7 Objetivos de Desarrollo sostenible ODS 24

1.2.8. Economía circular dentro del sector cafetalero 26

1.2.9. Rendimiento de biogás 27

1.3. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN (ESTADO DEL ARTE) 28

2. DISEÑO METODOLOGICO..... 31

2.1. Tipo de investigación..... 31

2.1.1. Enfoque de la investigación 31

2.2. Población y muestra..... 29

2.2.1. Población y muestra 32

2.2.2. Criterios de inclusión 32

2.2.3 criterios de exclusión 33

2.3. Instrumentos de recolección de datos 33

2.4. Análisis y tabulación de datos 34

2.6. Hipótesis y variables 34

Objetivo 1 34

Objetivo 2 .....**¡Error! Marcador no definido.**

Objetivo 3 36

2.7. Métodos y procedimientos 37

3. DESARROLLO DEL TEMA..... 41

3.1. Objetivo 1: Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de la cáscara, pulpa y mucílago de Café. 41

3.2 Objetivo 2: Identificar los factores clave que se deben tener en cuenta en el proceso de digestión anaerobia. 54

3.3 Objetivo 3: Describir una estrategia de cierre de ciclo de vida para una propuesta teórica de implementación de un sistema de digestión anaerobia. 68

4. Conclusiones 81

5. Recomendaciones 83

6. BIBLIOGRAFIA 84

Tabla de Tablas

Tabla 1 Objetivo de desarrollo sostenible en el marco de esta investigación...... 26
Tabla 2 Tipo de variable e indicadores de los residuos del café...... 35
Tabla 3 Tipo de variable e indicadores del sistema de digestión anaerobia..... 36
Tabla 4 Tipo y variable 37
Tabla 5 Porcentaje fruto y humedad..... 44
Tabla 6 Composición lignocelulósica y características....**¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 7 Cascara de café .....**¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 8 Pulpa de café.....**¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 9 Mucilago de café.....**¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 10 Tipo de mezcla.....**¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 11 Condiciones operativas y factores de interés en el proceso de digestión 63
Tabla 12 Parámetros operativos para la digestión anaerobia de residuos de café en biodigestor ..... 7|

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1 Proceso de digestión anaerobia 21
Ilustración 2 Imagen tomada de "teCH4 (tech4plus.com, 2025.)". 78

Agradecimientos:

En primer lugar, agradezco a Dios por la vida cada día, por darme la sabiduría fortaleza y la para desarrollar esta importante etapa de mi formación profesional. Su guía ha sido fundamental en cada uno de los pasos dados a lo largo de este proceso.

A mis padres, Omar Rico Montesino y Yudy Milena Carrascal por su apoyo y amor incondicional, sus sacrificios y su confianza permanente en mí. Infinitas gracias por ser mi principal fuente de motivación y por inculcarme valores que me han llevado a alcanzar logros que son míos y de ellos.

A mi directora de proyecto, MSc. María del Mar Prieto Manosalva y codirectora de proyecto, MSc. Yina Paola Ortega Santiago por su acompañamiento, orientación, compromiso, aportes y disposición a lo largo del desarrollo de esta investigación.

Extiendo mis agradecimientos a mis evaluadores, Mag. Luis Eduardo Galezo Guerra y al Esp. Julio César Socarras Ballesta, por sus valiosas observaciones para el fortalecimiento significativo del carácter técnico y académico de esta investigación. A los docentes del programa de ingeniería agroindustrial que fueron participes de mi formación profesional.

Finalmente, expreso mis agradecimientos a todas las personas de mi círculo familiar y social que contribuyeron a mi crecimiento personal y profesional.

A todos, muchas gracias.

Denilson Rico Carrascal

Agradecimientos:

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para terminar esta importante etapa de mi formación profesional y peronal.

Agradezco profundamente a mi padre, Ernediz Villegas Ortega; a mi hermano, Esneider Enrique Villegas Sanguino; y a mi pareja, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida, por su apoyo incondicional y su confianza. y sus constantes palabras de motivación, las cuales me impulsaron a continuar avanzando en los momentos más difíciles.

De igual manera, a mi directora de proyecto, MSc. María del Mar Prieto Manosalva y codirectora de proyecto, MSc. Yina Paola Ortega Santiago en especial, por su orientación, dedicación y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo.

Extiendo mis agradecimientos a mis evaluadores, Mag. Luis Eduardo Galezo Guerra y al Esp. Julio César Socarras Ballesta, por la disposición para revisar y evaluar el presente trabajo de investigación. Al grupo de docentes del programa de ingeniería agroindustrial que fueron partícipes de mi formación profesional.

Por último, agradezco a mis compañeros y amistades, quienes compartieron conmigo este camino académico.

A todos, muchas gracias.

María Angelica Villegas Sanguino

RESUMEN

El aprovechamiento de los residuos generados por la industria cafetera representa una alternativa para reducir su impacto ambiental y favorecer el cierre del ciclo de vida de la biomasa mediante la producción de energía renovable. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la viabilidad técnica de obtener biogás a partir de cáscara, pulpa y mucílago de café en el departamento del Cesar. Se desarrolló una monografía de carácter descriptivo, no experimental y con enfoque mixto, mediante revisión y análisis de literatura científica sobre las características fisicoquímicas de estos residuos y las variables que condicionan la digestión anaerobia. Los resultados evidenciaron que los tres residuos presentan materia orgánica biodegradable y potencial para la generación de biogás, destacándose la pulpa por su contenido de humedad, azúcares y sólidos volátiles. Asimismo, la codigestión y los pretratamientos favorecen la estabilidad del proceso. Se concluye que estos residuos presentan viabilidad técnica para su aprovechamiento energético bajo condiciones operativas adecuadas.

Palabras claves: Biogás, digestión anaerobia, energía renovable, metano, pulpa de café.

ABSTRAC

The use of waste generated by the coffee industry is an alternative to reduce its environmental impact and help close the biomass life cycle through the production of renewable energy. This research aimed to assess the technical feasibility of obtaining biogas from coffee husks, pulp, and mucilage in the Cesar department. A descriptive, non-experimental monograph with a mixed approach was developed, through a review and analysis of scientific literature on the physicochemical characteristics of these wastes and the variables that influence anaerobic digestion. The results showed that all three wastes contain biodegradable organic matter and have potential for biogas generation, with pulp standing out due to its moisture, sugar, and volatile solids content. Likewise, codigestion and pretreatments improve the stability of the process. It is concluded that these residues are technically feasible for energy recovery under suitable operating conditions.

Key words: Anaerobic digestion, biogas, coffee pulp, methane, renewable energy.

1. INTRODUCCIÓN

Según lo expuesto por la Federación Colombiana de Cafeteros, el café producido en los últimos 12 meses alcanzó aproximadamente un número de 14,99 millones de bultos de café equivalentes a 60 kg, marcando un récord histórico para el país, la zona suroccidental del país corresponde al 21,04% del total de esta producción (Estadísticas Cafeteras - Federación Nacional de Cafeteros, 2025).

La elevada producción no solo evidencia su importancia económica, sino que también el número de residuos producidos en el proceso de beneficio, se ha estimado que los residuos derivados del tratamiento de frutas y hortalizas permiten recuperar entre un 15% y un 65% del material, en formas como semillas, cortezas, cáscaras o tallos; en el caso específico del café aunque a nivel mundial sea uno de los alimentos más populares, se registra un bajo nivel de aprovechamiento del fruto, a pesardel gran consumo de café en todo el mundo, el aprovechamiento de su fruto es limitado, porque solo el 6% y el 8% de la cereza se destina a la obtención de grano de verde, por otro lado el 90% se considera residuo compuesto por pulpa, cáscara y mucílago (Tsigkou et al., 2024), si bien el mucílago se encuentra en un porcentaje del 11.8% del fruto, este puede variar dependiendo de su tamaño o variedad.

A lo largo del aprovechamiento de este grano, el mucílago entra en contacto con el agua, lo que ocasiona su descomposición y la separación del fruto del grano, en esta fase se producen aguas mieles con mucha materia orgánica, especialmente en las etapas de despulpado y lavados; en dichos procedimiento tanto la cáscara como el mucílago son arrastrados por grandes cantidades de agua, formando residuos orgánicos biodegradables

conformados por muchos nutrientes como nitrógeno y fósforo; desencadenando un fenómeno conocido como eutrofización si esas aguas no reciben un tratamiento adecuado.

La eutrofización es un impacto fundamental asociado al vertimiento de aguas resultantes del beneficio del café, ya que el alto volumen de nitrógeno y fósforo en los ecosistemas estimula un crecimiento de algas, disminuyendo el oxígeno, alterando la calidad de agua y la disponibilidad de recursos hídricos (Rodríguez Valencia et al., 2015). Este proceso es fundamental por la gran evidencia de la necesidad de un mejor manejo ligado a la disposición final de los residuos que resultan del proceso.

Por otro lado, estudios de campo e investigaciones en Colombia han señalado un consumo de agua entre 50 - 63 litros de este recurso (Campos et al., 2020).

Colombia, a pesar de ser uno de los países potencia en producción cafetera, aún precisa de un desarrollo técnico y tecnológico en cuanto al manejo de estos residuos generados del cultivo y beneficio del café ya que generalmente las fincas no tienen sistemas que les ayude a darle el fin o la gestión adecuada a estos residuos, lo que lleva a la disposición de estos en suelos o fuentes de agua (Fernández Cortes et al., 2020).

El mucílago, las cáscaras y demás residuos generan impactos ambientales muy significativos, ya que están directamente relacionados con el efecto negativo de suelos y cuencas cercanas a la zona de cultivo o beneficio. Entender el potencial energético que estos residuos pueden generar hace que sea de suma importancia desde una perspectiva social, ambiental y económica (Rodríguez Valencia et al., 2015).

De acuerdo con el comité cafetero del departamento de Antioquia, hasta MAY/2023 se estimaba que existían más de 658 mil pequeñas fincas cafeteras en el país, sembrando alrededor de 840 mil hectáreas de este grano a lo largo del territorio nacional, lo que deja en evidencia la importancia de esta actividad para la economía colombiana (Peralta, 2023). Por ende, es importante buscar acciones de mejora o soluciones para esta zona, de forma que se asegure en primera instancia la producción limpia y en segunda medida la reducción de la contaminación a niveles bajos para promover un enfoque sostenible.

Ante el problema generado por los residuos del aprovechamiento del café, como la eutrofización de cuerpos de agua, resulta fundamental considerar alternativas sostenibles para su manejo, en este contexto, los mecanismos de generación de biometano surgen como una estrategia para valorizar los residuos agrícolas; en particular, la generación de biogás partiendo de residuos cafeteros mediante digestión anaerobia se perfila como solución técnica viable, ya que permite tratar de forma adecuada los subproductos de esta industria, mitigando su impacto ambiental, esta alternativa no solo contribuye a reducir el deterioro de los ecosistemas, sino que también disminuye la dependencia de fuentes energéticas convencionales, promoviendo así una economía circular (Fernández-Cortés et al, 2020).

Pese a las ventajas ambientales y energéticas que ofrece la digestión anaerobia, su aplicación en Colombia ha sido históricamente limitada, tradicionalmente, estos procesos se han implementado principalmente en actividades pecuarias, especialmente en sistemas porcinos y bovinos; por ejemplo, a través del uso de biodigestores alimentados con residuos orgánicos generados por aproximadamente 2.300 cerdos y 1.300 reses, se logró

una producción energética cercana a los 500 kW, energía que ha sido destinada a cubrir las necesidades básicas de operación en las propias granjas, esta experiencia demuestra el potencial de los sistemas anaeróbicos no solamente para el tratamiento de residuos, sino qe además como fuente alternativa de bioenergía, lo que abre la posibilidad de aplicar tecnologías similares en otras industrias agrícolas, como la cafetera (Cervi et al., 2011).

La experiencia y el conocimiento acumulado en Colombia durante más de tres décadas en el manejo de biodigestores en zonas fuera del casco urbano evidencia el el poder estos residuos orgánicos para la generación de energía, esta tecnología ha sido implementada principalmente para suplir necesidades básicas, como la cocción de alimentos, lo que demuestra su viabilidad y adaptabilidad en contextos con recursos limitados, este antecedente no sólo valida la eficacia de los procesos anaeróbicos a pequeña escala, sino que también abre la posibilidad de escalar su aplicación a otras industrias agropecuarias, como la cafetera, donde los residuos generados podrían aprovecharse de manera similar para producir biogás, reduciendo así daños medioambientales y fomentando el desarrollo sostenibles en las diferentes zonas. En la actualidad esta práctica ha tomado relevancia en diferentes industrias especialmente en las generadoras de material orgánico como la alimentaria, la ganadera, la industria agrícola y la industria de purificación de aguas, ya que es la forma de reducción de residuos, generación de empleo, producción de combustibles y contribución a la caída de los gases de efecto invernadero (Alengebawy et al., 2024).

No obstante, la viabilidad técnica de la generación de biogás con residuos cafeteros no está determinada únicamente por la cantidad o composición del residuo disponible, su

éxito va ligado al control estricto del proceso de digestión anaerobia, condiciones como temperatura, el potencial de hidrogeno, la relación carbono/nitrógeno, lo concentrado de los sólidos y la CO (carga orgánica) aplicada influyen directamente en la actividad de las metanobacterias, varios de estos parámetros pueden generar inestabilidad en el proceso, disminuir la eficiencia de degradar la materia orgánica y reducir el rendimiento del sistema Mao et al. (2015). Por esta razón, el estudio de la viabilidad técnica debe considerar no solo el potencial bioquímico de los residuos cafeteros, sino también la capacidad de mantener condiciones operativas adecuadas que garanticen un funcionamiento estable y eficiente de los biodigestores.

En este orden de ideas, esta investigación está dirigida a estudiar la viabilidad de la obtención de biogás de los residuos cafeteros en el departamento del Cesar, teniendo en cuenta otros departamentos que emanan estos residuos abordando los ODS, especialmente el ODS 7 (energías a la mano y que no contaminan), el ODS 12 (consumo y producción responsable) y el ODS 13 (acciónes por el clima) (Gamez, 2022).

Con base en el recopilado de datos sobre la producción de remanentes para la gestión de la biomasa residual, y en concordancia con lo establecido en la Ley 1715-2014 promueve la adopción de energías limpias no comunes al sistema nacional de energias, se plantea la necesidad de explorar alternativas sostenibles en contextos agroindustriales; en este marco, surge el siguiente interrogante de investigación:

¿de qué manera la digestión anoxigénica de residuos cafeteros puede contribuir a la obtención de biometano como estrategia de sostenibilidad en el sur del Cesar?

1.1. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL: Evaluar la viabilidad técnica de obtener biogás como estrategia de cierre de ciclo de vida a partir de residuos orgánicos producidos por la industria cafetera, como cáscaras, pulpa y mucílago de café, en el sur del Cesar.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de la cáscara, mucilago y pulpa del café.

Identificar los factores clave que se deben tener en cuenta para el proceso de digestión anaerobia.

Describir una estrategia de cierre de ciclo de vida para una propuesta teórica para llevar a cabo un sistema de digestión anaerobia.

1.2. MARCO TEÓRICO

1.2.1. La generación de biometano a partir de digestión anoxigénica.

La producción de biometano partiendo de residuos cafeteros mediante el proceso de digestión se realiza como una solución técnica viable, ya que permite darle manejo a los residuos que resultan del aprovechamiento del café como fuente de energía limpia y renovable, este proceso biológico se basa en transformar el material orgánico en condiciones de cero oxígeno, es decir, bajo condiciones anaerobias. En este contexto, estos residuos agroindustriales del café, contienen materia orgánica compleja (azúcares, proteínas y lignocelulosa) que puede ser degradada por acción microbiana.

Este proceso se hace en un biodigestor hermético, donde se controlan variables como potencial de hidrógeno, humedad y temperatura. En este proceso se desarrollan 4 momentos principales: la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y por ultimo la metanogénesis. En la última fase, los ácidos grasos volátiles y el hidrógeno producidos antes de convierten principalmente en biogas (CH_4) y (CO_2).

De esta forma, la digestión anaerobia no solo ayuda a la reducción de remanentes orgánicos, sino que además promueve la producción de energía renovable, convirtiéndose en una alternativa sostenible para el tratamiento de residuos en la industria cafetera (Silva, 2023).

1.2.2. Características fisicoquímicas de los residuos del café (pulpa, cáscara, mucílago)

Los residuos obtenidos del proceso de aprovechamiento del café, han sido importantes por su hemicelulosa, cuyas características son un pH ácido, que varia entre 3.5 y 5.0, con una alta DQO (demanda química de oxigeno), con altos porcentajes de solidos (Rivera, 2023).

Hasta el 95% del fruto fresco del café que puede ser transformado mediante fermentación alcohólica, utilizando levaduras como Saccharomyces cerevisiae, para la obtención de bioetanol; estos subproductos resaltan en su importancia por poseer una alta carga de material orgánico fácilmente biodegradable, convirtiéndolos en materiales para ser utilizados en procesos de biotecnología como la digestión anaerobia, dejando como resultados con parámetros que reflejan su riqueza nutricional (Vázquez & Dacosta, 2023).

1.2.3. Factores de influencia en la generación de biogas.

La generación de biometano por medio de digestión anaerobia está determinada por unos factores fisicoquímicos, biológicos y operativos que desarrollan una actuación muy importante en el proceso y en la cantidad de metano generado, la gestión de estas variables es importante para garantizar el óptimo rendimiento en los sistemas de biodigestión y de más precisión especialmente cuando se trabaja con residuos orgánicos con características como es el caso de la pulpa (Tg et al., 2022).

Entre los factores fisicoquímicos más importante se encuentra el pH, el cual debe estar entre 6.5 y 8.5, de lo contrario un pH inferior puede afectar el trabajo de las metanobacterias que participan en la formación de biogás como lo son las bacterias metanógenas, el caso de los residuos del café que presentan un pH ácido es necesaria una regulación más detallada para garantizar condiciones para los microorganismos

responsables del proceso anaerobio; la temperatura también es importante, sus rangos más comunes para la digestión anaerobia son el mesofílico (30–40 °C) y el termofílico (50–60 °C), siendo el primero el más utilizado por su estabilidad, estas variaciones térmicas afectan la actividad bacteriana, acelerando la degradación de la materia orgánica (Yans Puebla, 2012).

La relación del nitrógeno y el carbono (C/N) debe conservarse alrededor de 20:1 y 30:1, ya que de lo contrario se puede acumular el amoníaco o ácidos grasos volátiles al unir esto con una cantidad de exceso de carga orgánica, podrían reducir significativamente la producción de metano, en este contexto retención hidráulica (TRH) y carga orgánica aplicada al biodigestor son importantes y deben ser cuidadosamente ajustados dependiendo de las características del sustrato, ya que tiempos demasiado cortos estarían impidiendo la degradación del material orgánico (Lasso et al., 2022b).

1.2.4. Inhibidores específicos

Los inhibidores selectivos o también llamados inhibidores específicos son sustancias actúan sobre blancos biológicos como enzimas, transportadores e incluso receptores para interferir en su actividad, con una alta afinidad para estos organismos minimizando sus propios efectos en otros blancos (Del Prete & Pagano, 2024).

En cuanto a la producción de biogas y el sector agroindustrial, estos inhibidores no son fármacos o sustancias que se sintetizan en laboratorios, sino que son factores o compuestos orgánicos que traen afectaciones a la digestion como las concentraciones altas de NH3 (amonio libre) o nitrógeno amoniacal que afecta directamente el proceso de metanogénesis (Yang et al., 2024). Incluso, ácidos grasos de cadenas largas que se derivan de residuos lipídicos, estos residuos impiden la actividad de las bacterias hidrolíticas y

acetogénicas, además sulfuros, sulfatos, metales pesados y otros tóxicos orgánicos alteran la relación entre microorganismos que son necesarios para la generación de biogás (Pilarska et al., 2023).

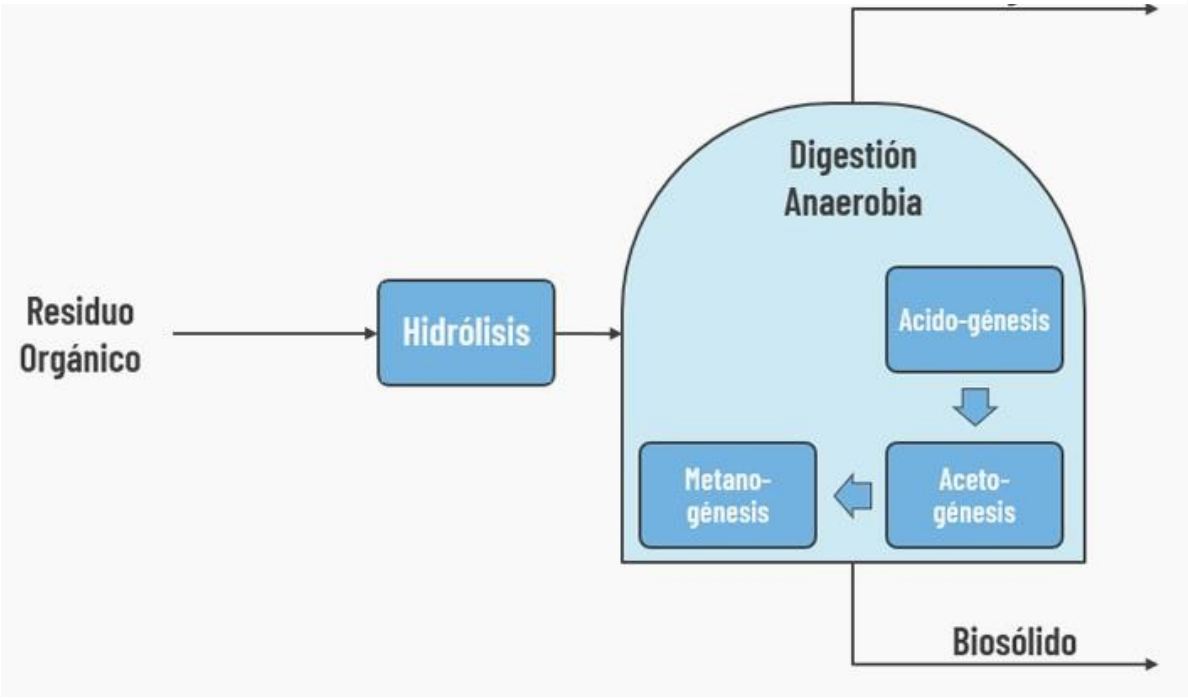
1.2.5. Inhibición de proceso, mecanismos de control y estrategias de mitigación.

La digestión anaerobia al llevarse a cabo de manera biológica, es muy sensible a cambios operacionales, por lo que diferentes factores pueden provocar la inhibición los microorganismos y reducir eficiencia del biogás. Las principales efectos de inhibición se son las variaciones extremas del pH, la generación de muchos AGV (ácidos grasos volátiles), las elevadas concentraciones de amoniaco y la sobrecarga orgánica. Estas condiciones afectan especialmente a los microorganismos metanógenos, los cuales llevan a cabo la producción del metano (Revisiones Sobre Energías Renovables Y Sostenibles | Revista | ScienceDirect.com Por Elsevier, 2025).

Para evitar justamente estos efectos, es necesario implementar mecanismos que permitan mantener la estabilidad del sistema, entre los parámetros de mayor importancia se encuentra el monitoreo periódico del pH, temperaturas, carga aplicada y el conjunto entre ácidos grasos volatines y la alcalinidad. El seguimiento periodo de estas variables permite detectar anomalías antes de que afecten el rendimiento del digestor.

Las estrategias de mitigación incluyen la regulación de la carga de alimentación, el uso de sustancias amortiguadoras para estabilizar el pH, la mezcla optima del sustrato y la codigestión para mejorar el equilibrio nutricional. La aplicación de estas medidas contribuye a mantener la actividad microbiana, optimizar la generación de biometano y garantizar un desarrollo estable del sistema de digestión anoxigénica (Han et al., 2026).

Ilustración 1
Proceso de digestión anaerobia



1.2.6. Proceso de digestión anaerobia.

1.2.6.1. Hidrólisis

Como se observa en la ilustración 1, los lípidos, los azucares y los compuestos proteicos son degradados hasta obtener ácidos grasos, azúcares simples y aminoácidos por la acción enzimática en la hidrólisis. Si el sustrato alimentado al proceso de hidrólisis son residuos agroforestales la hidrólisis se llevará a cabo en más tiempo debido a los compuestos lignocelulósicos.

Las bacterias encargadas de la hidrólisis (bacterias hidrolíticas) producen una serie de enzimas como amilasa, celulasa y lipasa que se encargan de descomponer el material orgánico en monómeros.

1.2.6.2. Acidogénesis y Acetogénesis

Los monómeros (unidades básicas de los polímeros) son transformados ácido butírico, propiónico, acético,etc, alcoholes y otros gases. Esta etapa generalmente se desarrolla de forma rápida. La acetogénesis es la encargada dentro del proceso de transformar muchos de esos ácidos en, dióxido de carbono (CO2), hidrógeno molecular (H2) y acetato, estos son la alimentación principal de las bacterias metanogénicas.

1.2.6.3. Metanogénesis

A cargo de esta etapa se encuentran las arqueas metanogénicas, son el factor principal en la generación de metano (biogás), Estas se clasifican en 2 grupos:

- Acetoclásticas: convierten el acetato en CO2 y CH4.
- Hidrogeno tróficas: llevan a cabo la reducción de dióxido de carbono usando hidrógeno para generar metano.

Estos organismos son sensibles al pH, temperatura, presiones, inhibidores y a altas concentraciones de ácidos orgánicos, lo que obliga a tener un ambiente favorable para su desarrollo y actividad (Le Processus De Digestion Anaérobie: Un Viaje Fascinante Desde Los Residuos Hasta La Energía, 2025).

1.2.7 ODS – objetivos de desarrollo sostenible.

La iniciativa adoptada por parte de la ONU en el marco de la Agenda 2030 para la sostenibilidad y el buen desarrollo a nivel mundial, es un mecanismo que busca la armonía en tres dimensiones clave como el aumento de la economia, la convivencia en sociedad y mantener el medio ambiente sano (Mensah, 2019).

El sector agroindustrial es estratégico para lograr estos objetivos debido a la transformación de recursos naturales y aprovechamiento de los subproductos que se generan, obteniendo así bienes de consumo, desarrollo rural, generación de empleo, campos de estudio y contribución al mantenimiento del medio ambiente. de tal manera que, los ODS impulsan este sector hacia procesos limpios, amigables, eficientes y sostenibles, generando una conciencia sobre el uso racional de recursos hídricos, suelos, aire energía, teniendo en cuenta huellas de carbono y emisiones contaminantes, promoviendo la innovación tecnológica para la economía circular.

La generación de biogás aborda directamente ODS específicos que realzan la importancia de los trabajos investigativos y realización de proyectos que apunten a un futuro sostenible (Czekała et al., 2023).

Tabla 1
Objetivo de desarrollo sostenible en el marco de esta investigación.

ODS DESARROLLO SOSTENIBLE.	Descripción.
Objetivo 7	Energía a la mano sin contaminantes
Objetivo 8	Crecimiento de la economía y trabajos decentes
Objetivo 9	Infraestructura e innovación industrial
Objetivo 12	consumo y producción responsable
Objetivo 13	Buenas prácticas climaticas
Objetivo 15	Vida de ecosistemas terrestres

1.2.8. Economía circular dentro del sector cafetalero

Los remanentes de un cultivo y beneficio cafetero, como pulpa, cáscara y pozos, han sido considerados desechos, pero demostrando que estos subproductos pueden ser transformados mediante diversos procesos tecnológicos, contribuyendo al valor agregado y a una economía circular dentro del sector cafetero.

Inicialmente, representan un uso marginal frente al volumen real de residuos generados, gracias a esto se han llevado a cabo estrategias innovadoras para el desarrollo de energias, destacando procesos de la fermentación, pirólisis, transesterificación y la digestión anaerobia; la digestión anaerobia del agua drenada del extracto de cereza de café ha mostrado resultados promisorios, debido a ser rico material orgánico y microorganismos activos que puede ser sometida a fermentación controlada para reducir su pH y activar la generación de un biocombustible como se mencionó, de tal manera reportando un rendimiento alrededor de 0.500 - 0.598 m^3 de biogás por kg de materia orgánica, con unas

concentraciones de metano entre el 55% y el 61%, lo cual demuestra una fuente energética renovable (Gurrea, 2020).

Al implementar principios de sostenibilidad que se relacionan con ODS dentro de los procesos productivos permite aminorar los efectos al medio ambiente y mejorar el uso de recursos disponibles, de tal manera que promueve una mejor gestión de los residuos lo cual fortalece la economía circular (Debbie Upegui, 2022).

1.2.9. Rendimiento de biogás

Cuando se enfatiza en el rendimiento de un biogás obtenido de residuos de café como cáscara, pulpa o mucílago, se hace referencia a una serie de ecuaciones matemáticas las cuales expresan un mecanismo cuantitativo para realizar cálculos que llevan al interesado al conocimiento de un rendimiento de biogás (Babaei & Shayegan, 2019).

Ecuaciones de rendimiento

Ecuación general para el rendimiento de un biogás.

YBG= $\boldsymbol{VBG/mSB}$

- YBG: rendimiento de biogás (m^3 biogás / kg SV o NL biogás / kg SV)
- VBG: volumen total de biogás producido (m^3 o NL)
- MSV: masa de sólidos volátiles alimentados/degradados (kg SV)
- SV = Sólidos Volátiles, la fracción orgánica biodegradable del residuo.

Ecuación de rendimiento metanogénico. YCH4 = YBG * fCH4

- YCH4: rendimiento específico del metano (m3 CH4 / KgSV)
- CH4: fracción molar del metano en el biogás

Ejemplificación aplicada a un residuo del café.

Un experimento con cáscara de café obtuvo 0.52 m3 de biogás al degradar 1.5 kilogramos de SV. YBG=0.52/1.5 = 0.347m^3 biogás / kg SV

Si el biogás tiene un 60% de metano, entonces:

YCH4=0.347×0.60 = 0.208 m^3 CH_4 / kg SV.

1.3. ESTADO DEL ARTE: ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Durante los últimos años, la valorización de los residuos agrícolas ha cobrado una importancia destacada en el desarrollo de alternativas energéticas sostenibles como la cáscara y el pergamino han demostrado un notable potencial para generar metano favoreciendo así la transición hacia modelos de economía circular y sostenibilidad (González, 2019).

A nivel internacional, investigaciones desarrolladas en Perú evaluaron la codigestión de estiércol de cerdos con cáscaras del café, determinando que una mezcla compuesta por un 60 % de estiércol y un 40 % de cáscara puede generar hasta 0,14391 m^3 de biogás en un periodo de 25 días, estos resultados confirman la eficiencia del proceso y su potencial energético (Venkatesh, 2021). De igual forma, coinciden con las experiencias reportadas en otros países de América Latina, donde aprovechar los residuos cafeteros se

ha posicionado como una estrategia sostenible para producir biogás y bioetanol, al tiempo que disminuye las afectaciones ocasionadas por aguas residuales.

De manera complementaria, en Honduras se ha evidenciado que los residuos del café poseen valores energéticos significativos: la pulpa prensada puede producir alrededor de 0,025 TEP/Ha-año, el mucílago 0,0157 TEP/Ha-año y el pergamino 0,0929 TEP/Ha-año; además, la digestión anaerobia aplicada a estos subproductos permitió alcanzar rendimientos alrededor de 0,30 - 0,46 m^3 de biometano por kg de (DQO), con reducciones de carga orgánica de hasta el 95 % (Cabrera Juan, 2011). Al comparar estos datos con los obtenidos en Perú, se observa que los resultados son equivalentes al normalizar las unidades por masa o DQO, lo que sugiere que factores como las condiciones operativas y las condiciones como se encuentre el sustrato influyen más que la ubicación geográfica en la eficiencia del proceso, este hallazgo evidencia la necesidad de establecer parámetros experimentales estandarizados para futuras investigaciones.

En el contexto colombiano, los estudios también respaldan el poder de generar energia de los subproductos cafeteros, Cenicafé (2023) resalta que la cascarilla y la pulpa pueden ser utilizadas para producir biogás, biodiésel o bioetanol. Igualmente, Barajas (2023) indica que la instalación de biodigestores rurales permite aprovechar estos desechos, disminuir su impacto ambiental e impulsar el desarrollo de energías limpias en las zonas cafeteras, contribuyendo así al cumplimiento de los objetivos nacionales de sostenibilidad energética.

En cuanto a la región Caribe, una investigación desarrollada en Villanueva (La Guajira) identificó que la cascarilla de café posee un poder calorífico de hasta 31.204 kJ/kg, esto deja ver que es un principio viable para la producción de biogás, briquetas y

bioetanol; no obstante, también se evidenció la falta de programas de valorización en la zona, situación que ha generado la pérdida de más de 46.000 litros de bioetanol potencial y la contaminación de aproximadamente 4.300.000 de litros de agua por un manejo inadecuado de los residuos del café (Morales, 2018), aunque este estudio es anterior, sigue siendo pertinente al reflejar desafíos aún presentes en diversas regiones cafeteras del país.

Finalmente, en el departamento del Cesar, los avances recientes en sostenibilidad agroindustrial han sido documentados por CORPOCESAR (2021) y la Universidad Nacional de Colombia (2024) ambos reportes destacan la adopción de estrategias de manejo medioambiental, uso eficiente de recursos y adopción de tecnologías limpias enfocadas en la valorización de subproductos agrícolas, en particular, el diagnóstico actualizado del Cesar (universidad nacional colombiana, 2024) es clara en hacer necesario el impulso a los programas de aprovechamiento de residuos en municipios como Aguachica, promoviendo proyectos de digestión anaerobia que impulsen el desarrollo energético local y la sostenibilidad del sector agroindustrial.

2. DISEÑO METODOLOGICO

2.1. Tipo de investigación

2.1.1. Enfoque desarrollado en la investigación

Para el desarrollo de esta monografía correspondió a una investigación de carácter descriptivo y no experimental, debido a que se orientó a generar conocimiento en torno al tratamiento de residuos orgánicos sin perseguir una aplicación práctica, tecnológica o comercial inmediata.

La clasificación como descriptiva se adoptó porque tuvo como finalidad caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los residuos cafeteros (cáscara, pulpa y mucílago) e identificar los factores clave que intervienen en el proceso de obtención de biometano mediante digestión en condiciones anoxigénicas.

Asimismo, se empleó el enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo), dado que este estudio desarrolló un análisis e interpretación de fuentes bibliográficas que contenían tanto información teórica como datos numéricos relevantes para el desarrollo del trabajo.
Enfoque cuantitativo: se utilizó para analizar las cualidades físicas y químicas de los remanentes cafeteros y las variables técnicas que deterioran el óptimo desarrollo del proceso de digestión (objetivos 1 y 2).

Enfoque cualitativo: se aplicó para describir la orientación teórica que sustenta la implementación de sistemas de digestión en condiciones anoxigénicas para el aprovechamiento de subproductos orgánicos (objetivo 3).

En concordancia con lo descrito por Ortega (2025), el enfoque mixto combina la compilación y el posterior análisis cualitativo y cuantitativo de la información, lo que permite una comprensión integral del fenómeno estudiado. Este tipo de diseño resultó

fundamental para interpretar de manera articulada los resultados teóricos y numéricos, logrando así un

entendimiento más completo del problema investigado.

2.2. Población y muestra

2.2.1. Población y muestra

La población de esta investigación está constituida por artículos académicos, científicos relacionados con la viabilidad técnica de obtener de biogás partiendo de residuos cafeteros.

Se incluyeron artículos de revistas indexadas, tesis, informes institucionales y publicaciones especializadas obtenidas de fuentes de datos reconocidas: Google Académico, Scielo, Scopus, ScienceDirect y Redalyc.

Para la recolección de información se utilizó la ecuación de búsqueda:

(“biogás” OR “methane”) AND (“coffee” OR “coffee pulp”) AND (“anaerobic digestion” OR “biotechnology”).

La búsqueda inicial arrojó aproximadamente 14.126 resultados correspondientes a documentos publicados entre los años 2015 y 2025. Posteriormente, se aplicaron filtros que permitieron seleccionar los estudios más pertinentes y actualizados, conformando una muestra final de 35 fuentes relevantes para el análisis.

2.2.2. Criterios de inclusión

- Documentos publicados en los últimos 10 años.
- Articulos en diferentes idiomas para una búsqueda más amplia.
- Fuentes con revisión por pares o respaldo institucional.

- Estudios relacionados con el aprovechamiento energético de residuos de café o procesos de digestión anaerobia.

2.2.3 criterios de exclusión

- Documentos sin respaldo académico o científico.
- Publicaciones redundantes o con información incompleta.
- Estudios que no trataran directamente la digestión anaerobia de residuos orgánicos.

La muestra seleccionada tuvo carácter intencional y no probabilístico, ya que la investigación no buscó representar estadísticamente una población, sino analizar y describir información relevante y actualizada sobre el tema.

2.3. Instrumentos utilizados para la recolección de datos

Para desarrollar esta investigación se emplearon instrumentos documentales y bibliográficos que permitieron recopilar, organizar y analizar información relevante para los objetivos del estudio.

Bases de datos científicas reconocidas como Scielo, Google Académico, ScienceDirect y Scopus, entre otras fueron utilizadas para llevar a cabo la búsqueda. Para ello, se utilizó el motor de búsqueda con la ecuación:

“biogás OR metano AND coffee AND biotechnology AND resource use”

El proceso se complementó mediante revisión bibliográfica y cibergráfica de fuentes confiables

Se establecieron como criterios de inclusión las publicaciones comprendidas entre 2015 y 2025, la pertinencia temática respecto al objeto de estudio y la relevancia científica. Como

criterios de exclusión se consideraron documentos redundantes, investigaciones no relacionadas directamente con el tema o sin respaldo académico.

2.4. Análisis y tabulación de datos

La información recolectada fue clasificada y organizada con base en criterios de sistematización, con el fin de otorgarle significado dentro del contexto del estudio. Posteriormente, se realizó el análisis correspondiente considerando la exactitud y lo confiable de los resultados obtenidos.

Para facilitar la interpretación de información, se emplearon herramientas como cuadros comparativos, tablas y otros recursos gráficos, los cuales permitieron una comprensión más clara y estructurada de los datos analizados.

2.6. Hipótesis y variables

Objetivo 1

Para el primer objetivo, se plantea esta hipótesis de investigación, la cual se evaluó por medio de un análisis documental bibliografico.

Hipótesis: *Las propiedades fisicoquímicas de los subproductos cafeteros como cáscara, mucilago y pulpa, como lo son la humedad, el potencial de hidrogeno pH, relación C/N y contenido de material orgánico, influyen directamente en su potencial para generar biogás.*

Nota: No se realizaron experimentos propios, por lo tanto la información tratada en este análisis proviene de fuentes bibliográficas extraídas de bases de datos confiables las cuales aportan artículos científicos.

Las variables fueron:

Tabla 2
Tipo de variable e indicadores de los residuos del café.

Tipo de variable	Variable	Indicador	Unidad
Independiente	Propiedades fisicoquímicas del residuo (cáscara, pulpa, mucílago)	Porcentaje de humedad Sólidos totales (ST, %) Sólidos volátiles (SV, % ST) pH (–) Relación C/N (–) DQO (mg O_2/L) Azúcares fermentables (g/kg)	% / mg O_2/L / g/kg
Dependiente	Potencial de producción de biogás (BMP)	Volumen de biogás producido Composición de metano (%CH_4)	m^3/ kg SV %

Objetivo 2

la siguiente hipótesis se planteo para el segundo objetivo, basados en bibliografía técnica documentada

Hipótesis*: El control de parámetros operacionales: pH, temperatura y tiempo de retención hidraulica optimiza la eficiencia y calidad del biogás generado a partir de residuos de café.*

Las variables fueron:

Tabla 3
Tipo de variable e indicadores del sistema de digestión anaerobia

Tipo de variable	Variable	Indicador	Unidad
Independiente	Condiciones de operación del proceso anaerobio	pH (–) Temperatura (°C) OLR: carga orgánica aplicada (kg DQO/m³·día) TRH: tiempo de retención hidráulica (días)	°C / kg DQO/m³·d / días
Dependiente	Desempeño del proceso	Rendimiento de biogás Porcentaje de metano (%CH_4) Eficiencia de remoción de carga orgánica	m³/kg SV%%DQO removida

Objetivo 3

Para el objetivo número 3, se planteó una hipótesis basada en revisiones de estudios respaldados con la normatividad vigente.

Hipótesis: *Una estrategia para el cierre de ciclo de vida basada en la digestión anaerobia de residuos de café favorece un aprovechamiento técnico y sostenible de estos subproductos en el contexto del departamento del Cesar.*

Las variables fueron:

Tabla 4
Tipo y variable

Tipo de variable	Variable	Indicador	Unidad
Independiente	Configuración teórica del sistema anaerobio	Tipo de biodigestor Volumen útil del reactor Modo de alimentación OLR de diseño (kg SV/m³·día) TRH de diseño (días)	kg SV/m³·d / días
Dependiente	Viabilidad técnica del sistema	Producción proyectada de biogás Contenido de metano (%CH_4) Energía útil estimada remoción de DQO o SV	m³/kg SV%kWh/día%

2.7 5. Métodos y procedimientos

Objetivo 1: Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del mucilago, la cáscara y la pulpa del café.

Para dar cumplimiento a este objetivo, estará constituido por etapas:

Etapa 1: Revisión y selección bibliográfica:

Se recopilo estudios científicos, informes técnicos y artículos indexados disponibles en fuentes confiables como ScienceDirect, Scielo, Google Académico y

Scopus, mediante la ecuación de búsqueda:

("biogás" OR "metano") AND ("coffee" OR "café") AND ("biotechnology" OR "anaerobic digestion"). Se priorizaron documentos publicados entre 2015 y 2025.

Etapa 2: Clasificación y organización de datos.

Se sistematizo las variables fisicoquímicas (potencial de hidrogeno, sólidos totales, humedad, relación C/N, DQO, contenido de materia orgánica, etc.) reportadas en los estudios seleccionados.

Los datos se organizaron en matrices de análisis comparativo (elaborada en Microsoft Excel) para facilitar la identificación de tendencias.

Etapa 3: Interpretación y análisis descriptivo:

- Se describieron las características promedio y los rangos más frecuentes de los parámetros, destacando cómo estos influyen en la generación de biometano.
- No hubo realización de experimentos, pero sí un análisis técnico basándose en documentos publicados

Objetivo 2: Identificar los factores de importancia en el proceso de digestión anaerobia.

Para dar cumplimiento a este objetivo, estará constituido por etapas:

Etapa 1: Revisión documental enfocada:

- Se seleccionaron y analizaron fuentes científicas relacionadas con las condiciones operacionales de la digestión anaerobia, incluyendo pH, temperatura, retención hidráulica carga orgánica aplicada y proporciones de mezcla.
- Posteriormente, se efectuó una lectura crítica orientada a identificar las relaciones

entre dichas variables y el desempeño del sistema.

Etapa 2: Construcción de tablas comparativas:

Con el apoyo de Microsoft Excel o Google Sheets, se elaboró tablas comparativas de cada parámetro técnico, incluyendo su rango operativo y efecto sobre la producción de biogás.

Etapa 3: Discusión:

- Se establecieron las tendencias más comunes en la literatura, relacionando las condiciones óptimas con los tipos de residuos de café.
- El análisis se sustentó en estudios internacionales y nacionales, complementado con información regional del departamento del Cesar.

Objetivo 3: Propuesta de orientación teórica para la implementación del sistema de digestión anaerobia basada en el análisis previo realizado.

Para dar cumplimiento a este objetivo, estará constituido por etapas:

Etapa 1: caracterización de subproductos cafeteros y su potencial:

- Con base en los datos obtenidos en las etapas previas, se sintetizan las propiedades más relevantes de los residuos del café (cáscara, pulpa, mucílago).
- Se determino su potencial energético teórico para digestión anaerobia, a partir de la información reportada por la literatura.

Etapa 2: Determinación de condiciones de operación:

- Se identifico las condiciones térmicas y químicas más adecuadas (pH, TRH, temperatura, relación C/N) según experiencias documentadas.

- Estas condiciones sirvieron como base para orientar la selección de sistemas de digestión apropiados a contextos rurales del Cesar.

Etapa 3: Selección teórica del biodigestor:

- Se evaluó distintos tipos de biodigestores (lote, continuo, flujo pistón, entre otros) en función del tipo de residuo y del entorno productivo.
- Se priorizo configuraciones de bajo costo y fácil implementación.

Etapa 4: Diseño conceptual y valorización de subproductos:

- Se propuso un esquema teórico del sistema de digestión anaerobio, considerando el flujo de entrada y salida de materia.
- Se incluyo estrategias de valorización del biogás y del digestato dentro de un modelo economicamente circular, orientado a la sostenibilidad energética rural.

3. DESARROLLO DEL TEMA

3.1. Objetivo 1: Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de la cáscara, mucilago y pulpa.

La viabilidad de utilizar residuos del beneficio del café (pulpa, mucílago y cáscara) como sustratos para digestión anaerobia depende directamente de sus propiedades fisicoquímicas, en este sentido, se analizaron parámetros reportados en la literatura, como lo son humedad, sólidos volátiles y totales, pH y relación entre carbono/nitrógeno (C/N), los cuales influyen en la generación de metano.

Los estudios revisados indican que la pulpa de café presenta un alto contenido de materia orgánica biodegradable, lo que favorece su aprovechamiento en digestión anaerobia, asimismo, el mucílago se caracteriza por su elevado contenido de azúcares fermentables, mientras que la cáscara posee una mayor proporción de material lignocelulósico, lo que puede limitar su degradación biológica y requerir tratamientos previos para mejorar su aprovechamiento (Yang et al., 2024).

Los residuos analizados corresponden a las tres fracciones principales del fruto:

Cáscara: capa externa del fruto, rica en lignina, celulosa y hemicelulosa; se caracteriza por su baja humedad y bajo grado de biodegradabilidad inicial.

Pulpa: tejido carnoso que rodea el grano; tiene alto contenido de humedad, carbohidratos solubles y compuestos fácilmente fermentables.

Mucílago: sustancia viscosa que recubre el pergamino; contiene azúcares solubles, pectinas y compuestos nitrogenados.

3.1.1. *Métodos de análisis utilizados para la caracterización fisicoquímica*

De este modo, la caracterización de residuos agroindustriales destinados a procesos de digestión anaerobia se realiza mediante métodos analíticos estandarizados que permiten determinar con precisión sus propiedades fisicoquímicas y garantizar la comparabilidad entre diferentes estudios.

En los estudios analizados sobre la caracterización fisicoquímica de la cáscara, el mucílago y la pulpa de café, los parámetros evaluados con mayor frecuencia fueron el contenido de humedad, sólidos totales y volátiles, pH, (DQO), el total de nitrogeno, azúcares fermentables y relación (C/N), estos factores fueron reportados por autores como Karki et al. (2025), Fridh et al. (2014), Rojas-Sossa et al. (2017) y otros estudios revisados, debido a su influencia en el desarrollo del proceso de digestión.

La humedad se determina mediante el método gravimétrico, que consiste en pesar una alícuota y secarla en estufa a una temperatura de 105 °C hasta alcanzar un peso constante, calculando la pérdida de masa correspondiente al contenido de agua, este parámetro es importante porque el proceso requiere condiciones húmedas para el adecuado desarrollo microbiano (Fridh et al., 2014).

Los (ST), solidos totales se obtienen después del secado de la muestra a 105 °C, por otro lado, los sólidos volátiles (SV) se determinan mediante calcinación en mufla a 550 °C, representando una fracción biodegradable relacionada con el potencial de generación de biometano (Passos et al., 2017).

El pH se mide con un potenciómetro digital en una suspensión del residuo con agua destilada, ya que valores demasiado bajos pueden afectar la actividad de los microorganismos metanogénicas.

La (DQO) se determina a partir de métodos de reflujo cerrado o colorimétricos, permitiendo estimar la masa de material orgánico presente y la carga orgánica disponible para el proceso de digestión Long et al. (2021).

El nitrógeno se cuantifica por medio del método Kjeldahl, que incluye digestión, destilación y titulación, y permite calcular la relación carbono/nitrógeno (C/N). Los azúcares fermentables se determinan mediante HPLC o espectrofotometría, mientras que la relación C/N se obtiene mediante análisis elemental o a partir de carbono y nitrógeno totales, considerándose óptimo un rango entre 20:1 y 30:1 para la digestión anaerobia (Aguirre, 2023).

En conjunto, estos residuos representan entre el 40 % y el 50 % del peso del fruto del café, lo que evidencia su potencial como materia orgánica aprovechable energéticamente para la producción de biogás, tal como ha sido reportado en la literatura científica (Villar et al., 2024; Karki et al., 2025, Villar et al., 2026); ahora bien, para entender mejor la distribución de estos residuos dentro del fruto del café y su contenido de humedad, a continuación, se presenta una síntesis de los valores reportados en la literatura.

Las características fisicoquímicas presentadas en las Tablas 5, 6, 7, 8 y 9 corresponden a valores reportados en la literatura científica para residuos del beneficio del café, debido a que la presente investigación tiene un carácter documental, no se realizó una caracterización experimental de muestras procedentes de fincas cafeteras del departamento

del Cesar, sin embargo, estos valores constituyen una referencia técnica que permite identificar el potencial de la pulpa, la cáscara y el mucílago para procesos de digestión anaerobia; se reconoce que factores como las condiciones climáticas, las características del suelo, la variedad cultivada y el método de beneficio pueden generar variaciones en la composición de los residuos, por lo que se recomienda desarrollar estudios de caracterización local en municipios cafeteros del Cesar para fortalecer futuros diseños técnicos.

Tabla 5
Porcentaje del fruto y humedad

Residuo	% del fruto	Humedad
Pulpa	42–44 % del fruto fresco	Humedad alta: 75–85 % (pulpa fresca)
Mucílago	11–15 % del fruto fresco	Humedad muy alta: 80–95 %
Cáscara	10–12 % (cascarilla)	Humedad baja en cáscara seca: 8–18 %; materia seca alta

Fuente: elaboración propia a partir de Hernández-Varela & Medina (2023), Sugebo (2022) y Rojas-Sossa et al. (2017).

Como se puede observar, la pulpa representa la mayor proporción del fruto y, junto con el mucílago, presenta altos contenidos de humedad, lo que favorece su degradación en

procesos biológicos. En contraste, la cáscara presenta menor humedad, lo que puede influir en su velocidad de descomposición dentro del proceso anaerobio.

3.1.2 *Composición lignocelulósica y características*

Por otra parte, resulta importante analizar la composición estructural de estos residuos, especialmente celulosa, hemicelulosa y lignina, ya que estos compuestos influyen directamente en su biodegradabilidad.

Tabla 6
Composición lignocelulósica y características

Residuo	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Pulpa	29.11 %	12.01 %	17.86 %
Mucílago	Bajo en fracción	Bajo en fracción	Bajo en fracción
Cáscara	45.86 %	15.86 %	27.04 %

Fuente: elaboración propia a partir de Sugebo (2022), Rodriguez-Quiroz et al. (2023) y Hernández-Varela & Medina (2023).

En este sentido, se evidencia que la cáscara presenta un mayor contenido lignocelulósico, lo que explica su menor degradabilidad en comparación con la pulpa y el mucílago. Esto implica que, en diferentes situaciones, puede requerir pretratamientos o ser utilizada en procesos de codigestión.

3.1.3 *Composición de pH, DQO y sólidos, Relación C/N, DQO, Azúcares.*

En relación con las características específicas de cada residuo, a continuación, se presentan los principales parámetros fisicoquímicos reportados para la cascara de café.

Tabla 7
Cascara de café

Parámetro	Rango
pH	4.5–5.5
Humedad	10–12 %
Sólidos totales	88–90 %
Sólidos volátiles	70–80 % ST
Relación C/N	25:1–30:1
DQO	300,000 mg O_2/kg

Fuente: *elaborado a partir de Sugebo (2022), Karki et al. (2025) y Rojas-Sossa et al. (2017).*

A partir de estos datos, se puede inferir que la cáscara posee una estructura más estable y menos biodegradable inicialmente, debido a su bajo contenido de humedad y alto porcentaje de sólidos, aunque su relación C/N resulta favorable para procesos de digestión anaerobia.

Pulpa de café:

De manera similar, la pulpa de café presenta características particulares que la convierten en uno de los residuos más relevantes dentro del proceso de aprovechamiento energético.

Tabla 8
Pulpa de café

Parámetro	Rango
pH	3.5–5.0
Humedad	70–85 %
Sólidos totales	15–30 %
Sólidos volátiles	85–92 % ST
Relación C/N	20:1–35:1
DQO	80,000–250,000 mg O_2/kg
Azúcares fermentables	8–12 %

Fuente*: elaborado a partir de Karki et al. (2025), Rojas-Sossa et al. (2017) y Hernández-Varela & Medina (2023).*

Como se observa, la pulpa presenta alto porcentaje de humedad, sólidos y azúcares fermentables, lo que favorece su rápida degradación y la convierte en un sustrato altamente viable para obtener biometano.

Mucilago de café

En cuanto al mucílago, este residuo también presenta propiedades que lo hacen especialmente interesante para procesos biotecnológicos como la digestión anaerobia.

Tabla 9
Mucilago de café

Parámetro	Rango
pH	3.5–4.5
Humedad	85–90 %
Sólidos totales	10–15 %
Sólidos volátiles	80–90 % ST
Relación C/N	12:1–18:1
DQO	50,000–100,000 mg O_2/kg

Fuente: elaborado a partir de Rojas-Sossa et al. (2017), Sugebo (2022) Karki et al. (2025).

En este caso, el mucílago destaca por su alta humedad y contenido de compuestos solubles, lo que facilita su biodegradación; sin embargo, su baja relación C/N puede requerir ajustes operacionales para evitar desequilibrios en el proceso.

3.1.4. *Componentes orgánicos relevantes*

Diversos estudios coinciden que la pulpa representa aproximadamente entre el (40-50)% de la cereza seca de café, constituyéndose como el principal residuo generado durante el beneficio húmedo; así mismo presenta un alto contenido de humedad, generalmente en un rango de (80 – 85)% lo cual favorece su biodegradabilidad y su aprovechamiento en el proceso de digestión anaerobia, lo que indica que la pulpa posee condiciones fisicoquímicas adecuadas para su rápida descomposición, facilitando su uso como en obtención de biogás (Carmen et al., 2020).

Observando la composición, la pulpa destaca por su elevado contenido de material biodegradable alcanzando valores cercanos al 90 % en base seca, lo que deja en evidencia su potencial energético (Salcedo et al., 2021). Además, tiene una fracción importante de hidratos de carbono, en forma de azúcares solubles como de compuestos estructurales, lo que la convierte en un residuo altamente aprovechable (Sumardiono et al., 2021).

Podemos afirmar que este material orgánico impulsa las fases iniciales de la digestión anaerobia, mejorando el rendimiento del proceso.

En la pulpa fresca se encuentran los siguientes azúcares:

- Glucosa
- Fructosa
- Sacarosa

La presencia de estos azúcares fermentables ha sido identificada, destacando su papel en la rápida activación de la fase acido-génica del proceso anaerobio, facilitando la formación de ácidos grasos volátiles (Fierro et al., 2025). Sin embargo, su concentración puede variar en función del grado de maduración del fruto y las condiciones del procesamiento, lo que sugiere que la variabilidad en la composición del sustrato puede influir directamente en la velocidad de producción de biogás, siendo necesario considerar estas condiciones para optimizar el proceso.

La amplia diferencia entre la composición de los subproductos cafeteros representa un desafío para la viabilidad técnica de la digestión anaerobia, ya que diferencias en factores como el porcentaje de humedad, azúcares fermentables, sólidos volátiles, pH y relación C/N pueden generar cambios en el rendimiento de biogás y en la estabilidad del proceso, esta falta de uniformidad dificulta la estandarización de las condiciones operativas, debido a que un mismo sistema puede responder de manera diferente según las características del residuo alimentado, para este efecto, por eso se recomienda realizar una caracterización previa del sustrato, ajustar parámetros operativos como el pH, la carga orgánica aplicada y el tiempo de retención hidráulica.

En cuanto a la composición mineral, diferentes investigaciones han identificado la presencia de macronutrientes, así como micronutrientes, en proporciones variables (Fierro et al., 2018). Esta variabilidad está asociada a factores como el origen del cultivo y las características del suelo, lo que indica que, aunque los minerales se encuentran en bajas concentraciones, su presencia es relevante para el adecuado desarrollo de la actividad microbiana.

A pesar de ello, estos elementos desempeñan un papel importante como cofactores enzimáticos, contribuyendo al metabolismo de los organismos involucrados en la digestión anaerobia (Karki et al., 2025). Entendiendo que la composición mineral de la pulpa no solo aporta nutrientes, sino que también favorece la estabilidad y eficiencia del proceso biológico.

3.1.5. *Compuestos fermentativos*

En concordancia con lo expresado en los documentos científicos, la pulpa de café puede presentar compuestos intermedios originados a partir de procesos fermentativos naturales que se desarrollan desde las primeras etapas posteriores al despulpado: entre los principales compuestos identificados se destacan:

- Ácido acético
- Etanol

Estos compuestos se producen como consecuencia de la degradación inicial de los azúcares presentes en la pulpa, lo que indica que el sustrato puede ingresar al biodigestor con cierto grado de fermentación previamente iniciado (Skerlos et al., 2025). Lo que indica que el residuo posee una ventaja operativa, al disminuir los tiempos requeridos para la adaptación de los microorganismos.

Diversas investigaciones han demostrado que esta condición favorece el proceso de digestión anaerobia, debido a que reduce la fase de adaptación microbiana y acelera la estabilización del sistema, esto arroja un mayor rendimiento en la obtención de biometano (Karki et al., 2025).

Discusión.

A partir de la revisión bibliográfica, se puede decir que los residuos del café pulpa, mucílago y cáscara sí tienen características que los hacen útiles para procesos de digestión anaerobia, no siempre presentan la misma composición, ya que esta puede cambiar según la especie de café, el tipo de beneficio, el clima y el manejo después de la cosecha.

Además, varios estudios coinciden en que la combinación de estos residuos mediante procesos de codigestión permite aprovechar mejor las características fisicoquímicas de cada uno, favoreciendo un mayor equilibrio en la relación C/N y una estabilidad más precisa durante el proceso de digestión.

Si se comparan estos residuos, la pulpa de café es la que más destaca en la mayoría de los estudios, esto se debe a que tiene bastante humedad, azúcares fermentables y sólidos volátiles, lo que hace que se descomponga más rápido al inicio del proceso de digestión, favoreciendo la producción de biogás.

El mucílago también se comporta de manera favorable, al tener muchos compuestos solubles y azúcares simples, se degrada con facilidad y contribuye a la formación de ácidos grasos volátiles, la relación C/N suele ser baja, lo que puede generar desequilibrios si se usa solo, por eso, en varios estudios se sugiere combinarlo con otros residuos para mantener el proceso más estable (Arega et al., 2026).

Hablando de la cáscara, la situación cambia un poco, porque tiene más celulosa, hemicelulosa y lignina, por lo que su degradación es más lenta, pero, aun así, no deja de ser útil, ya que su relación carbono/nitrógeno suele estar en rangos adecuados, lo que permite

usarla como complemento cuando se mezcla con otros residuos que se degradan más rápido (Córdova-Mosquera et al., 2025).

Al revisar distintos estudios, se ve que parámetros como el pH, la DQO y la relación C/N se mantienen en rangos similares, aunque no son exactamente iguales en todos los casos, las cuales estas diferencias se explican, en gran parte, por el tipo de procesamiento del café, especialmente si es por vía húmeda o seca, ya que esto influye en la composición de los residuos, diferentes casos documentados convergen en que aprovechar estos residuos es más eficiente cuando se combinan, ya que la codigestión permite equilibrar la relación C/N, mantener la estabilidad del pH y facilitar la degradación de los compuestos más complejos (Karki et al., 2025).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, combinar la pulpa, el mucílago y la cáscara dentro de un mismo sistema resulta viable, ya que permite aprovechar mejor las cualidades de los residuos y obtimizar el funcionamiento del proceso.

3.2 Objetivo 2: Identificar los factores clave que se deben tener en cuenta en el proceso de digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es un proceso por el cual materia orgánica se descompone en condiciones anoxigénicas generando principalmente gases como CO2 y metano, lo que se conoce como el biogas y un subproducto llamado digestato el cual es buenafuente de carbono con gran potencial de uso en enmiendas de suelos y biorremediación (Meegoda et al., 2018). Este proceso se ha utilizado mucho en los últimos años, involucra diferentes etapas y una serie de condiciones de operación que garantizan la eficacia del proceso si se mantiene entre los regímenes admitidos.

Este proceso de transformación de material orgánico, a lo largo de las últimas décadas se ha estudiado no solo su eficiencia y eficacia, sino también en la manera de soportar inhibidores durante el proceso y los residuos lignocelulósicos del café. La literatura reciente exclama que los parámetros operativos condicionan de manera vital el buen desarrollo del proceso (Lv et al., 2021).

3.2.1. *Factores de operación.*

3.2.1.1. Temperatura: los rangos mesófilos y termófilos siguen siendo los más estudiados y usados con temperaturas que actúan entre los (30 - 40) grados centígrados y entre (50 - 55) grados centígrados respectivamente. las revisiones recientes señalan que, aunque un rango de temperatura termófilo puede derivar en un grado de degradación más elevado y por ende producción de biogás, también aumenta la sensibilidad a perturbaciones, por lo que la elección debe garantizar un balance entre rendimiento y estabilidad según la naturaleza del recurso que se esté tratando y la zona donde opere el digestor.

3.2.1.2. Potencial de hidrógeno (pH): una acidez que exige los 6.8 y 7.5 para el proceso de metanogénesis es primordial, en caso de no ser así, se conducirá a acumulaciones AGV (ácidos grasos volátiles) y una pérdida de la actividad metanogénica justamente, la exigencia en la vigilancia conjunta de ácido-base es un factor de interés que funciona como un indicador de inestabilidad del proceso (Diniz et al., 2025).

3.2.1.3. Composición de sustrato y relación C/N: la proporción de C y N, la porción lignocelulósica y la fracción de compuestos fenólicos o grasas, condicionan gravemente la biodegradabilidad, la codigestión con sustratos ricos en N (nitrógeno) funciona como estrategia para equilibrar la relación C/N y mejorar la producción (Tsigkou et al., 2024).

3.2.1.4. Inhibidores (amonio, AGV en exceso, sulfuro de hidrógeno, compuestos fenólicos): Estudios realizados recientemente analizan mecanismos de inhibición y exponen medidas para mitigarlos como ajustes en la carga, la codigestión, incorporación de absorbentes como biochar o control de la relación entre el pH y la temperatura (Yang et al., 2024).

3.2.1.5. Diseño del reactor, factores de importancia y mezcla: la eficiencia de la digestión anaerobia depende críticamente del diseño del reactor, las características del sustrato (tamaño de partículas y porcentaje de sólidos) y el nivel de la mezcla. Estos son factores del proceso que determinan el contacto del microbiota con el sustrato, la homogeneidad del sistema y la transferencia de masa. En el caso de residuos de café (cáscara, pulpa y mucílago), su naturaleza fibrosa y la presencia de sólidos estructurales hacen que esta área sea especialmente crítica (Chen et al., 2024).

3.2.2. *Tipo de reactor*

Cada configuración de reactor para la digestión en condiciones anoxigénicas da ventajas y limitaciones ante los sustratos fibrosos como los presentes en los residuos cafeteros (pulpa, cáscara, pergamino).

- CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor): Este es el más recomendado para proceso de digestión en materiales que por su naturaleza tienen un alto contenido de sólidos presentes y caracterizados por descomponer partículas más gruesas, además de que facilita la mezcla continua, reduciendo las zonas muertas. De igual manera evita la sedimentación o flotación excesiva que es típica de la pulpa de café.

- Reactores tipo Batch: Adecuados para pruebas piloto, aunque para industrializar requieren control cuidadoso del agua y mezcla inicial para evitar estratificación una de sus limitaciones es que tienden a generar acumulación de gas atrapado en fibras si no hay agitación constante que proporcione una mezcla uniforme en todo el proceso.

- UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket): estos no son ideales para residuos fibrosos sin pretratamiento, debido a que las fibras interfieren con la formación del manto de lodos y generan taponamientos. En cambio, son más apropiados para residuos líquidos como aguas mieles de beneficio húmedo del café justamente.

- Reactores de lecho fijo o fluidizado: Funcionan de manera óptima cuando el sustrato es predominantemente líquido y se puede dosificar el material orgánico con bajo contenido de sólidos. La pulpa y la cáscara requieren pretratamiento para evitar la colmatación del medio empacado.

- Digestores de alta carga (High Solids; Dry AD): Recomendados para materiales entre 15–40 % de sólidos, las cáscaras de café encajan en este tipo de sistemas, pero demandan mezclas potentes o rotativas (Kumar et al., 2024).

3.2.3. *Tipo de mezcla.*

Durante la digestión anaerobia para generar biometano, el tipo de mezcla dentro del digestor constituye un principal de deriva en el buen funcionamiento del sistema. Este hace referencia al grado de homogeneización del sustrato y a la forma en que los microorganismos entran en contacto con la materia orgánica, lo cual repercute directamente en variables como la estabilidad del pH, la distribución de nutrientes y la generación de biogas.

Dependiendo del diseño del digestor y de las condiciones operativas, pueden presentarse diferentes tipos de mezcla, que van desde sistemas completamente homogéneos hasta aquellos con mínima o nula agitación. Desde ahora, se presentan los principales tipos de mezcla usados en la industria del biogás y sus características más relevantes. (Shoshaa et al., 2024).

Tabla 10
Tipo de mezcla

Tipo de mezcla	Definición	Ventajas	Limitaciones
Mezcla mecánica	Agitación mediante paletas, hélices o rotores que generan movimiento directo dentro del reactor.	• Alta eficiencia en sustratos sólidos y fibrosos. • Rompe capas flotantes. • Favorece la transferencia de masa.	• Mayor consumo energético. • Puede dañar biomasa sensible. • Desgaste de equipos.
Mezcla neumática	Inyección de biogás desde el fondo del reactor para generar turbulencia y movimiento ascendente.	• Bajo consumo energético. • Sin partes móviles internas. • Buena aireación del contenido líquido del digestor.	• Menor eficiencia en sustratos muy viscosos. • No rompe fibras grandes. • Requiere sistema de recirculación de biogás.
Mezcla hidráulica	Recirculación del digestato mediante bombeo para redistribuir sólidos y microorganismos.	• Suave con la biomasa. • Mantiene homogeneidad sin equipos mecánicos internos. • Eficiente para digestores líquidos.	• Depende de bombas y tuberías. • Puede fallar con sustratos muy densos. • Menor capacidad para romper flotantes.

Mezcla intermitente	Alternancia entre periodos de mezcla y reposo (ej. 10 min/hora) para optimizar energía y rendimiento.	• Mayor eficiencia energética. • Mejora la retención de biomasa. • Reduce el riesgo de lavado de • sólidos.	• Requiere programació n precisa. • Puede favorecer la formación de flotantes si el intervalo de tiempo • es muy largo.

(Neuner et al., 2024).

3.2.4. Carga orgánica aplicada (OLR)

La Carga Orgánica Aplicada (OLR) es la masa de material orgánico (generalmente expresado como sólidos volátiles, o demanda química de oxígeno —DQO—) que entra en el reactor. La unidad más usada en ingeniería de digestores es kg VS / m^3·d (equivalente a g VS / L·d). La OLR es el parámetro de diseño y operación que cuantifica "cuánta materia orgánica entra al reactor por día" y, por tanto, condiciona la velocidad con la que la biomasa microbiana debe procesarla (Kumar et al., 2024).

La OLR es una variable operativa central debido a que controla la demanda metabólica sobre la comunidad microbiana. A mayor OLR, mayor producción de sustratos intermedios (monómeros, AGV) que se deben descomponer por acción microbiana de organismos acetogénicos y metanógenos, si la entrada de materia sobrepasa la capacidad de ser consumida por las etapas siguientes, se acumulan ácidos grasos volátiles (AGV) y baja el pH, lo que inhibe la metanogénesis (Sun et al., 2024).

De igual manera, determina la velocidad de degradación aparente enfatiza en que la fracción biodegradable del sustrato define cuánta de la OLR es efectivamente convertida por día. Los sustratos lignocelulósicos (cáscara/pulpa de café) tienen fracciones recalcitrantes que reducen la tasa de conversión, por lo que la OLR efectivo debe ser menor o acompañarse de pretratamientos. El Impacto directo en el tamaño del reactor y en la TRH para una OLR dada, el volumen de reactor y la TRH (tiempo de retención hidráulica) deben garantizar tiempo suficiente para la mineralización; si la OLR aumenta, sin aumentar volumen o TRH, la conversión se reduce y el sistema se vuelve inestable (Zhang et al., 2023).

Basado en la literatura de los últimos 3 años y en ensayos específicos con pulpa de café, se recomiendan rangos iniciales operativos.

3.2.5. Valores conservados para monografías y pruebas piloto

Sin pretratamiento (residuos frescos, alto contenido lignocelulósico y compuestos inhibidores):

0.5 – 1.5 kg VS / m^3·d (0.5–1.5 g VS/L·d). Iniciar en el extremo inferior y aumentar de forma progresiva si la estabilidad lo permite (Gonzalez-Piedra et al., 2021).

Con pretratamiento moderado (físico: trituración o químico suave: alcalinización/levemente térmico):

1.5 – 3.0 kg VS / m^3·d. Los pretratamientos aumentan la accesibilidad de la celulosa/hemicelulosa y reducen la fragilidad frente a sobrecargas en el proceso. Estudios

con pretratamiento térmico/ácido sobre pulpa de café han mostrado permitir OLR más altos sin inestabilidad (Nava-Valente et al., 2021).

Con pretratamientos intensivos (hidrotermal, químico fuerte, u otros que aumenten notablemente biodegradabilidad):

3.0 – 5.0 kg VS / $m^3 \cdot d$ en sistemas bien controlados y típicamente en configuración de dos etapas, estos valores son alcanzables en sistemas industriales bien diseñados para lignocelulósicos, pero requieren un monitoreo estricto (Zheng, Li, 2024).

3.2.6. Efectos por sobrecarga (qué pasa si la OLR es demasiado alta) Acumulación de AGV

La acidogénesis supera la capacidad consumidora de acetogénesis/metanogénesis llevando a un aumento de AGV (acetato, propionato, butirato). Los AGV bajan el pH y reducen la actividad metanogénicas.

3.2.7. Inhibición microbiana y cambio de comunidad

Aumento de amonio libre si hay N orgánico u otros inhibidores que junto a AGV afectan las arqueas metanogénicas, reduciendo el rendimiento de metano CH_4 (Kumar et al., 2024).

3.2.8. Espumas, taponamientos y problemas físicos

En sustratos con mucílago o pectinas, la sobrecarga favorece formación de espuma que aparecen tras someter las sustancias a calentamiento y costras flotantes que impiden una mezcla eficaz.

3.2.9. Condiciones de operación y factores de interés del proceso de digestión.

Tabla 11

Condiciones operativas y factores de interés en el proceso de digestión

Parámetro	Rango operativo óptimo	Influencia sobre la producción de biogás	Riesgos por desviaciones	Referencia
pH	5,8 – 7,4	Garantiza la actividad micrbiana y la estabilidad del sistema	Acidificación Inhibición microbiana	(Hao et al., 2023)
Temperatura °C	Mesofílica 35-38 Termofílica 52-55	Aumenta la velocidad de degradación y rendimiento del biogás	Caída drástica de metano Inestabilidad por choques térmicos Muerte de biomasa activa	(Shen et al., 2023) (Lai et al., 2023)

Carga orgánica OLR	1.0–3.0 kg VS/m³·d para residuos de café	Controla el flujo de alimentación al reactor y la carga metabólica	Sobreacumulación de ácidos grasos volátiles Caída del pH y fallas del proceso	(Anaya-Reza et al., 2024)
Tiempo de retención hidráulica TRH	20-35 días	Aseguranza de tiempo suficiente para lograr degradación completa	Lavado de biomasa Reducción de metano y baja eficiencia	(Krishnaraj et al., 2022)
Relación C/N	20:1 30:1	Optimiza el balance nutricional microbiano y reduce la inhibición.	Inhibición por exceso de nitrógeno (NH_3) o bajo rendimiento por falta de N	(Du et al., 2023)
Ácidos grasos volátiles AGV	<2000 mg/L	Indicador temprano de estabilidad y control de pH	Acidificación, colapso del reactor	(Elena et al., 2024.)
Sólidos totales/volátiles ST/SV	ST: 8–12% / SV: 70–85%	Determina la capacidad de carga y eficiencia del sustrato	Sedimentación, baja degradabilidad	(Eftaxias et al., 2024) (He et al., 2024)

***Fuente**; elaboracio propia a partir de (Hao et al., 2023), (Shen et al., 2023), (Lai et al., 2023), (Anaya-Reza et al., 2024), (Krishnaraj et al., 2022), (Du et al., 2023), (Elena et al., 2024.), (Eftaxias et al., 2024), (He et al., 2024).*

Si bien las características fisicoquímicas del mucílago de café, la cascara y la pulpa de café determinan su potencial como sustratos para la generación de biometano, la viabilidad técnica del proceso no depende exclusivamente de la naturaleza del residuo empleado. El éxito de la digestión anaerobia está estrechamente relacionado con el control de las condiciones operativas del sistema, tales como el potencial de hidrógeno, temperatura, la carga orgánica, el tiempo de retención hidráulica y la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos. En este sentido, incluso residuos con un alto potencial energético pueden presentar bajos rendimientos de biogás si no se conservan factores adecuados de operación. Por tanto, la optimización y la supervisión de los parámetros de importancia para la generación de biometano.

Discusión

Recientemente en la literatura se observa una clara tendencia a considerar los subproductos cafeteros, especialmente la pulpa, el mucílago y la cáscara como fuentes prometedoras para obtener biometano. Por ejemplo, un estudio sobre el potencial bioenergético de los subproductos cafeteros reporta un rendimiento significativo de biogás, estimando que la digestión anaerobia de mucílago podría generar altos volúmenes de metano para uso térmico o eléctrico (Albarracin et al., 2024).

Los estudios demuestran también que la pulpa, caracterizada por una mayor concentración de azúcares, se degrada de forma acelerada la cual favorece la producción de metano cuando se mezcla de forma adecuada o se le realiza un pretratamiento, por ejemplo, en un sistema batch, un rango de temperatura mesofílica (35-38) °C se ha reportado la manera en que los aditivos biológicos o químicos han mejorado la generación de biometano a partir de subproductos cafetros (Getachew et al., 2023).

Además, estudios hechos en los últimos años estudian la codigestión de cáscara y pulpa de café con otros residuos orgánicos como estiércol animal para aumentar el rendimiento en la generación de biogás estabilizando el pH, optimizando la relación C/N (Lourenço et al., 2024).

La estacionalidad de residuos del sector cafetero y la necesidad de implementar estrategias de operación para darle un manejo óptimo a las fluctuaciones en el sector son de gran relevancia, ya que justamente la estacionalidad del café genera picos de generación de este grano y a su vez residuos, por lo que se recomienda digerir con otros residuos agrícolas para mantener la síntesis de biogás constante a lo largo de del año (Albarracin et al., 2024).

En lo que respecta a los factores físicos, la alta humedad presente en el mucílago es favorable para implementar sistemas con digestores “húmedos”. Sin embargo, la pulpa por sus características fibrosas, requiere un pretratamiento como el triturado, debido a que da una superficie de contacto mayor con la biomasa microbiana activa, esto va de la mano y coincide con estudios que señalan que el materia particulado a degradar va ligado con la degradación del mismo y la generación de biogás (Budiyono et al., 2022).

Desde la química, el pH es generalmente ácido en los residuos del café después de lograr el beneficio del grano, lo que arroja un indicador de inestabilidad en el biodigestor si no se corrige, además la presencia de fenoles y cafeína podría derivar en la inhibición de algunas fases operativas si no se gestionan adecuadamente. Estudios demuestran que la codigestión con residuos que contengan un mayor porcentaje de amonio aminora este efecto (Widjaja et al., 2021).

En lo que al rendimiento se refiere, se estima que la descomposición del mucílago puede lograr mayores volúmenes específicos de metano debido a su degradabilidad, seguido por la cáscara y la pulpa, esto está directamente relacionado con estudios realizados a producción de metano con múltiples residuos de café, donde se señala que aunque la cáscara sea un poco menos eficiente debido a su contenido de lignocelulosa, sigue siendo muy viable si se realiza la operación adecuada (Albarracin et al., 2024). Ahora, respecto a las tecnologías aplicables al desarrollo del biogás, los modelos óptimos corresponden a biodigestores batch y reactores para codigestión especialmente cuando hay una combinación de residuos de café con lodos residuales o estiércol animal. Esta estrategia

permite mejorar el pH, balancear la relación C/N y mantener la estabilidad durante períodos de alta producción de residuo (Alrawashdeh et al., 2025).

3.3 Objetivo 3: Describir una estrategia de cierre de ciclo de vida para una propuesta teórica de implementación de un sistema de digestión anaerobia.

En el departamento del Cesar, las actividades agroindustriales y agrícolas generan una alto número de subproductos orgánicos, entre los cuales se destacan los provenientes del beneficio cafetero, como la pulpa, el mucílago y la borra; estos subproductos suelen ser dispuestos de manera inadecuada o desaprovechados, lo que representa una pérdida de su potencial energético y un problema asociado al manejo de residuos orgánicos.

La caficultura tiene presencia significativa en el territorio, especialmente en zonas rurales de municipios como Aguachica, Pueblo Bello, La Paz, Codazzi y Valledupar, según información del Sistema de Información Cafetera citada en proyectos regionales, el Cesar cuenta con aproximadamente 7.991 caficultores, 8.342 fincas cafeteras y 22.989 hectáreas cultivadas en 19 municipios, lo que evidencia una actividad cafetera relevante en el departamento (Composición Microbiana Del Proceso De Fermentación Del Café Producido En El Departamento Del Cesar, n.d.).

En Colombia, los residuos provenientes de la industria cafetera han sido identificados como sustratos con alto potencial para la generación de metano mediante digestión anaerobia, gracias a su composición orgánica y disponibilidad asociada a la actividad cafetera. Estos residuos representan una estrategia para valorizar la biomasa residual y el aprovechamiento sostenible de los subproductos agroindustriales (Vanegas et al., 2023).

En este contexto, la digestión anaerobia aparece como una alternativa tecnológica viable para aprovechar esos subproductos y transformarlos en biometano, un combustible renovable.

Este procedimiento se lleva a cabo en sistemas cerrados llamados digestores, donde es necesario controlar aspectos como el pH, la temperatura, la carga orgánica y el tiempo de retención hidráulica (Londoño, 2017).

De lo anterior, se plantea una propuesta teórica para implementar un sistema de digestión de subproductos de forma anoxigénica mediante un biodigestor continuo tipo CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor o reactor continuamente agitado), diseñado para el descomponer residuos de café generados en el departamento del Cesar.

3.3.1. Propuesta teórica del sistema de digestión anaerobia.

Con el fin de aprovechar en forma de energía los subproductos generados durante el procesamiento del café, este tipo de reactor se caracteriza por mantener una mezcla constante del sustrato dentro del sistema, lo que permite una distribución homogénea de las bacterias metanógenas y los nutrientes, favoreciendo la estabilidad del proceso biológico y evitando la sedimentación de sólidos (Shah et al., 2024).

Para la alimentación del sistema se consideran residuos de café generados en Aguachica y otras zonas cafeteras del departamento del Cesar, principalmente pulpa, mucílago y cascara de café, los cuales presentan alto contenido de materia orgánica biodegradable y potencial para la producción de biogás.

Para el adecuado funcionamiento del biodigestor tipo CSTR propuesto para el aprovechamiento de subproductos de café, es necesario controlar ciertos parámetros

operativos que influyen en la estabilidad del proceso anaerobio y en la producción de biogás.

3.3.2. Parámetros operativos para la digestión anaerobia de residuos de café en biodigestor tipo CSTR.

Tabla 12
Parámetros operativos para la digestión anaerobia de residuos de café en biodigestor

Parámetro	Rango operativo óptimo	Influencia sobre la producción de biogás	Riesgos por desviaciones	Referencia
pH	5,8 – 7,4	Garantiza la actividad de las bacterias metanogénicas y la estabilidad del sistema	Acidificación Inhibición microbiana Caída drástica de metano	(Hao et al., 2023)
Temperatura °C	Mesofílica 35-38 Termofílica 52-55	Aumenta la velocidad de degradación y rendimiento del biogás	Inestabilidad por choques térmicos Muerte de biomasa activa en el proceso	(Shen et al., 2023) (Lai et al., 2023)

Carga orgánica OLR	1.0–3.0 kg VS/m³·d para residuos de café	Controla el flujo de alimentación al reactor y la carga metabólica	Sobreacumulación de ácidos grasos volátiles Caída del pH y fallas del proceso	(Anaya-Reza et al., 2024)
Tiempo de retención hidráulica TRH	20-35 días	Aseguranza de tiempo suficiente para lograr degradación completa	Lavado de biomasa Reducción de metano y baja eficiencia	(Krishnaraj et al., 2022)
Relación C/N	20:1 30:1	Optimiza el balance nutricional microbiano y reduce la inhibición.	Inhibición por exceso de nitrógeno (NH_3) o bajo rendimiento por falta de N	(Du et al., 2023)
Ácidos grasos volátiles AGV	<2000 mg/L	Indicador temprano de estabilidad y control de pH	Acidificación, colapso del reactor	(Elena et al., 2024.)
Sólidos totales/volátiles ST/SV	ST: 8–12% / SV: 70–85%	Determina la capacidad de carga y eficiencia del sustrato	Sedimentación, baja degradabilidad	(Eftaxias et al., 2024) (He et al., 2024)

De acuerdo con la información, mantener los parámetros dentro de los rangos óptimos permite mejorar la actividad de los microorganismos, reducir fallas operativas y maximizar la generación de biogás.

3.3.3. Producción estimada de biogás partiendo de residuos de café

La producción de biogás constituye uno de los principales beneficios del proceso de digestión anaerobia, ya que permite transformar material orgánico en una fuente de energía renovable, la cantidad de biometano producida en un sistema de digestión anaerobia depende de diferentes factores, de los cuales se destacan la composición del sustrato, el contenido de sólidos volátiles, las condiciones de operación del reactor y el rendimiento del proceso microbiológico (Karki et al., 2025).

Los residuos de café presentan buen potencial energético, en el caso de la cáscara de café, se registró una producción aproximada de 329,5 m^3 de biogás por tonelada de materia fresca, mientras que la borra de café presentó valores entre 225,4 y 270,9 m^3/t. Además, ambos residuos mostraron concentraciones de metano entre 52,6 % y 54,5 %, lo que confirma su viabilidad como fuente de bioenergía (Czekała et al., 2023).

Diferentes estudios reportan que los residuos de café pueden generar entre 0,30 y 0,45 m^3 de metano por kilogramo de sólidos volátiles degradados, lo cual demuestra su capacidad para ser aprovechados como fuente de bioenergía (Karki et al., 2025).

El biogás obtenido en el proceso de digestión anaerobia está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), siendo el metano el componente que determina su poder energético, el biogás contiene entre 55 % y 65 % de

metano, lo que le permite ser utilizado como combustible para diferentes aplicaciones energéticas (Czekała et al., 2023).

3.3.4. Aprovechamiento del digestato.

Durante el proceso de digestión anaerobia, se genera un subproducto denominado digestato, el cual corresponde al material residual que permanece después de la degradación de la materia orgánica dentro del biodigestor, este subproducto conserva una importante cantidad de nutrientes minerales como nitrógeno, fósforo y potasio.

Sin embargo, el digestato no debe considerarse únicamente como un residuo del proceso, gracias a su contenido de nutrientes y materia orgánica, puede ser aprovechado como fertilizante orgánico en actividades agrícolas; su aplicación en el suelo ayuda a mejorar la disponibilidad de nutrientes para los cultivos y contribuye a mantener la calidad del suelo, favoreciendo su productividad.

En el caso de la industria cafetera, el digestato puede utilizarse en los cultivos como una alternativa para devolver parte de los nutrientes que fueron extraídos durante la producción agrícola, además de obtener biogás como fuente de energía renovable, también se aprovecha un subproducto con potencial para apoyar las labores agrícolas y promover un mejor aprovechamiento de los residuos generados en el proceso. (Cheng et al., 2022).

3.3.5. Estrategia de cierre de ciclo de vida.

La estrategia de cierre de ciclo de vida dentro de la presente propuesta teórica se fundamenta en el aprovechamiento de los residuos generados durante el procesamiento del café, mediante la implementación de un sistema de digestión anaerobia que permita transformar dichos residuos en recursos energéticos y agrícolas.

Un aspecto importante a considerar en la evaluación de la viabilidad técnica de la producción de biogás a partir de residuos cafeteros es la estacionalidad en la generación de cáscaras, pulpa y mucílago de café. La disponibilidad de estos residuos depende directamente de los ciclos de cosecha y beneficio del café, lo que puede ocasionar períodos de abundancia seguidos por etapas de escasa generación de materia prima. Esta variabilidad representa un desafío para la operación continua de los sistemas de digestión anaerobia, ya que la estabilidad del proceso requiere un suministro constante de sustrato (Adnane et al., 2024).

Ante esta situación, la codigestión con otros residuos agrícolas o pecuarios disponibles en la región surge como una alternativa técnica viable para garantizar la continuidad operativa de los digestores. La incorporación de residuos como estiércol bovino, porcino o avícola, así como subproductos agrícolas provenientes de otras actividades agroindustriales, permite mantener una alimentación constante del sistema durante todo el año.

Adicionalmente, la codigestión puede mejorar el equilibrio nutricional del sustrato, optimizar la relación carbono/nitrógeno (C/N), incrementar la actividad microbiana y favorecer una mayor producción de biogás. Por tanto, la integración de residuos cafeteros

con otras corrientes orgánicas disponibles en el departamento del Cesar constituye una estrategia que no solo reduce los efectos de la estacionalidad, sino que también fortalece la viabilidad técnica y la sostenibilidad del aprovechamiento energético mediante digestión anaerobia (Akyol, 2020).

El sistema propuesto estaría conformado por varias etapas operativas:

3.3.5. Etapas propuestas del sistema de digestión anaerobia para residuos de café

1. **Recolección y preparación del sustrato.**

Como punto de partida, se considera una generación de residuos de café, estos residuos serían recolectados y posteriormente mezclados con agua, con el fin de facilitar su transporte, agitación y manejo dentro del sistema; a partir de esta dilución, se estima una alimentación hacia el biodigestor (Shah et al., 2024c).

2. **Dimensionamiento preliminar del biodigestor.**

Para el diseño teórico del sistema, se toma como referencia un tiempo de retención hidráulica de 30 días valor comúnmente utilizado en reactores continuos tipo CSTR para el tratamiento de residuos orgánicos, con base en este tiempo de permanencia y el caudal diario estimado, esto permitiría que la materia orgánica permanezca el tiempo necesario dentro del reactor para favorecer su degradación y mantener una operación estable (Simeonov, 2025).

3. **Proceso de digestión anaerobia.**

Una vez preparado el sustrato, este ingresa al biodigestor tipo CSTR donde se desarrollaría la digestión anaerobia en ausencia de oxígeno, en esta etapa, la agitación constante del reactor ayuda a mantener una mezcla homogénea del material, favoreciendo el contacto entre los microorganismos y la materia orgánica. (Lourenço et al., 2024).

4. **Obtención y aprovechamiento del biogás.**

El biogás producido está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, su generación depende de factores como la composición del sustrato, el contenido de sólidos volátiles y las condiciones de operación del sistema (Shah et al., 2024c).

En el caso de los residuos de café, diferentes estudios reportan rendimientos entre 0,30 y 0,45 m^3 de metano por kilogramo de sólidos volátiles degradados, lo que evidencia su potencial como fuente de energía renovable (Karki et al., 2025).

5. **Uso del digestato.**

Además del biogás, el proceso genera digestato, un subproducto rico en nutrientes que puede ser aprovechado como fertilizante orgánico en actividades agrícolas, de esta manera, no solo se obtiene energía renovable, sino también un material útil para mejorar la fertilidad del suelo y promover el aprovechamiento integral de los residuos.

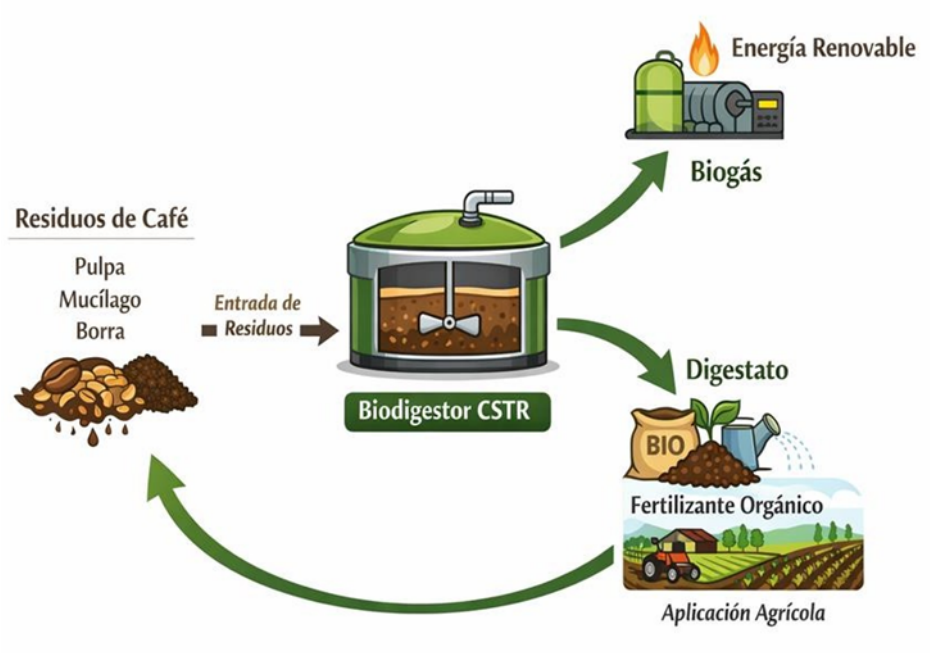
3.3.6. Fortalecimiento de capacidades técnicas y acompañamiento local

El acompañamiento técnico también permitiría fortalecer las capacidades locales para la gestión de residuos orgánicos y el aprovechamiento energético del biogás, promoviendo la adopción de prácticas más eficientes en el sector agroindustrial e impulsando el desarrollo de modelos productivos más sostenibles y adaptados a las condiciones del territorio.

Asimismo, resulta fundamental la capacitación de los operadores encargados del sistema, especialmente en aspectos relacionados con el manejo del biodigestor, el monitoreo de parámetros operativos y la identificación de posibles fallas que puedan afectar el proceso, de igual manera, el fortalecimiento de conocimientos técnicos en las comunidades y productores facilitaría la adecuada implementación, mantenimiento y continuidad de estas tecnologías, aumentando las probabilidades de éxito de los proyectos de aprovechamiento energético a partir de residuos cafeteros.

Esta propuesta de aprovechamiento permite establecer un ciclo cerrado de valorización de residuos, en el cual los subproductos generados durante el procesamiento del café son reincorporados nuevamente al sistema productivo.

Ilustración 2
Imagen tomada de "teCH4 (tech4plus.com, 2025.)".



Discusión.

En la presente propuesta se plantea la implementación teórica de un biodigestor continuo tipo CSTR como se observa en la ilustración 2; este tipo de reactor ha sido ampliamente utilizado en procesos de digestión anaerobia debido a su capacidad para mantener una mezcla homogénea del sustrato y favorecer la actividad microbiológica, lo que contribuye a mejorar la estabilidad del proceso y la eficiencia en la generación de este biocombustible.

Los resultados de la propuesta evidencian que la digestión anaerobia de residuos de café representa una alternativa viable para el aprovechamiento energético de subproductos agroindustriales, los parámetros operativos considerados se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura científica para residuos orgánicos; el control del pH entre 5,8 y 7,4 resulta de gran importancia para asegurar la actividad bacteriana en la síntesis de biogás (He et al., 2023).

De igual manera, la carga orgánica volumétrica propuesta entre 1,0 y 3,0 kg de sólidos volátiles por metro cúbico por día se ajusta a los valores recomendados para la digestión anaerobia de subproductos cafeteros, esto permite mantener un equilibrio metabólico dentro del reactor y evitar el exceso de ácidos grasos volátiles acunulados, por otro lado el monitoreo de estos compuestos es clave para prevenir la inestabilidad del sistema, ya que concentraciones elevadas pueden generar acidificación y afectar negativamente la generación de biogás (Cheng et al., 2022).

Con base en las estimaciones efectuadas, el sistema propuesto tendría una capacidad importante de producción de biogás, representando una fuente energética relevante para

usos agroindustriales o entornos rurales, estos resultados coinciden con investigaciones previas sobre digestión anaerobia de residuos de café, en las que se destaca el potencial de estos sustratos para la generación de energía renovable (Karki et al., 2025).

Asimismo, la incorporación de un programa de acompañamiento técnico para la operación y monitoreo del biodigestor constituye un elemento fundamental para garantizar la estabilidad del sistema y promover la adopción de este tipo de tecnologías en contextos locales.

Para concluir la implementación de estrategias de codigestión en reactores tipo CSTR favorece la estabilidad del proceso anaerobio, debido a que permite equilibrar las características de los sustratos y sostener parámetros operacionales adecuados para el desarrollo de la actividad microbiana. Esto contribuye al control de parámetros como el pH, la carga orgánica y la concentración de AGV (ácidos grasos volátiles) dentro del sistema.

4. Conclusiones

Desde la revisión bibliográfica realizada, se concluye que los residuos generados durante el beneficio del café, principalmente pulpa, mucílago y cáscara, presentan características fisicoquímicas que los convierten en sustratos con alto potencial para su aprovechamiento en procesos de digestión anaerobia, la literatura científica coincide en que estos subproductos contienen materia orgánica biodegradable, compuestos solubles y fracciones lignocelulósicas que, bajo condiciones adecuadas, pueden ser transformadas por acción microbiana en energía renovable; aunque existen variaciones en su composición asociadas a factores como la variedad del café, el método de beneficio y las condiciones agroclimáticas, en términos generales estos residuos presentan condiciones favorables para su uso en sistemas anaerobios, además, la revisión permitió identificar que parámetros como la humedad, el pH, la DQO, los sólidos volátiles y la relación carbono/nitrógeno influyen directamente en la eficiencia del proceso, determinando la velocidad de degradación y el potencial de generación de biogás de cada residuo evaluado.

A partir de la revisión bibliográfica, se evidencia un creciente interés científico en el aprovechamiento energético de residuos cafeteros, con estudios provenientes principalmente de países productores como Colombia, Brasil, Perú y Ecuador, la literatura muestra una tendencia hacia la implementación de estrategias como la co-digestión, el uso de pretratamientos y la optimización de variables operativas, con el fin de mejorar la degradación de la biomasa y la estabilidad del proceso digestores que proporcionan condiciones operacionales adecuadas para mantener la estabilidad del proceso y el correcto desarrollo de parámetros como el pH, la relación C/N y la carga orgánica.

Los resultados teóricos permiten inferir que la digestión anaerobia de estos residuos constituye una alternativa viable para la generación de energía y la gestión sostenible de subproductos agroindustriales. No obstante, se identifican desafíos como la estacionalidad en la generación de residuos y el limitado conocimiento técnico para la implementación de estos sistemas. Frente a ello, la literatura recomienda estrategias como la variabilidad con otros residuos orgánicos para garantizar la continuidad del proceso, así como el fortalecimiento de capacidades técnicas para su adecuada operación.

Se concluye que los biodigestores tipo CSTR representan la alternativa más adecuada para el tratamiento de residuos de café debido a su capacidad de mantener condiciones homogéneas y estables dentro del sistema. Su operación óptima se asocia a condiciones mesofílicas, control adecuado del pH, equilibrio en la relación carbono-nitrógeno y aplicación de pretratamientos en residuos fibrosos, en conjunto, estos elementos posicionan la digestión anaerobia como una opción viable para el cierre de ciclo de vida de estos subproductos y avanzar hacia modelos más sostenibles en la agroindustria.

5. Recomendaciones

Se recomienda a la comunidad académica y a futuros investigadores continuar profundizando en el estudio de la digestión ANAEROBIA aplicada a residuos del café, considerando que este campo aún presenta múltiples oportunidades de investigación. A partir de este proyecto se pueden derivar nuevas líneas de estudio relacionadas con la optimización de procesos, evaluación de nuevas tecnologías y análisis de eficiencia en diferentes condiciones operativas.

Se sugiere fortalecer los estudios en el área agroindustrial orientados hacia la sostenibilidad, promoviendo el aprovechamiento integral de residuos y la implementación de modelos de economía circular. La agroindustria, por su amplitud y diversidad, representa un campo idóneo para la generación de investigaciones innovadoras que contribuyan a la reducción de impactos ambientales y al uso eficiente de los recursos.

Se aconseja incentivar el análisis y la implementación de tecnologías basadas en energías renovables, como la producción de biogás, dentro de proyectos académicos y de investigación. Este tipo de iniciativas no solo aportan soluciones energéticas sostenibles, sino que también fortalecen la formación profesional de los estudiantes y promueven el desarrollo de alternativas limpias frente a los sistemas energéticos convencionales

6. BIBLIOGRAFIA

Adnane, I., Taoumi, H., Elouahabi, K., Lahrech, K., & Oulmekki, A. (2024). *Valorization of crop residues and animal wastes: Anaerobic co-digestion technology*. *Heliyon*, *10*(5), e26440. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26440

A. (2021). *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*. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01529-3

Aguirre, J. (2023). The Kjeldahl method. In The kjeldahl (pp. 53–78). https://doi.org/10.1007/978-3-031-31458-2_4

Albarracin, L. T., Mas, I. R., Fuess, L. T., Rodriguez, R. P., Volpi, M. P. C., & De Souza Moraes, B. (2024). *The Bioenergetic Potential from Coffee Processing Residues: Towards an Industrial Symbiosis. Resources,* 13(2), 21. https://doi.org/10.3390/resources13020021

Alengebawy, A., Ran, Y., Osman, A. I., Jin, K., Samer, M., & Ai, P. (2024). *Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review. Environmental Chemistry Letters,* 22(6), 2641-2668. https://doi.org/10.1007/s10311-024-01789-1.

Akyol, Ç. (2020). *In search of the optimal inoculum to substrate ratio during anaerobic co-digestion of spent coffee grounds and cow manure. Waste Management & Research the Journal for a Sustainable Circular Economy, 38(11), 1278–1283*. https://doi.org/10.1177/0734242x20914731

Alrawashdeh, K. a. B., Al-Samrraie, L. A., Damseh, R. A., Bsoul, A. A., & Gul, E. (2025). *Improving biogas production and organic matter degradation in anaerobic Co-*

Digestion using spent coffee grounds: A kinetic and Operational study. Fermentation, 11(6), 295. https://doi.org/10.3390/fermentation11060295

Anaya-Reza, O., Altamirano-Corona, M. F., Basurto-García, G., Patricio-Fabián, H., García-González, S. A., Martinez-Hernandez, E., & Durán-Moreno, A. (2024). *Wet anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste: experience with long-term pilot plant operation and industrial scale-up. Bioprocess and Biosystems Engineering, 47(2), 235–247*. https://doi.org/10.1007/s00449-023-02958-2

Aprovechamiento energético del metano generado en la digestión anaerobia de pulpa de café proveniente de fincas hortofrutícolas del Valle del Cauca y Nariño. (n.d.). https://redcol.minciencias.gov.co/Record/REPOUAO2_e77dc6597b9dc57771a44a7d9c58aa3a/

Arega, A. S., Tsigkou, K., Kassahun, S. K., & Angelidaki, I. (2026). *Sustainable valorization of coffee pulp: Evaluation of the pretreatment effect on the phenolic compounds recovery and anaerobic digestion of the residual biomass. Biomass and Bioenergy, 209, 108969*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.108969

Association, A. P. H. (1992). APHA, American Public Health Association,1992. *Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th edn. Washington, DC. In Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)*. https://doi.org/10.5281/zenodo.8371131

Babaei, A., & Shayegan, J. (2019). *Effects of temperature and mixing modes on the performance of municipal solid waste anaerobic slurry digester. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 17(2), 1077–1084*. https://doi.org/10.1007/s40201-019-00422-6

Banks, E., & Schwartz, S. D. (2023). *Co-opted energy transitions: Coal, wind, and the corporate politics of decarbonization in Colombia. Journal of Political Ecology,30(1).* https://doi.org/10.2458/jpe.5470

Biermann, F., Hickmann, T., Sénit, C., Beisheim, M., Bernstein, S., Chasek, P., Grob, L., Kim, R. E., Kotzé, L. J., Nilsson, M., Llanos, A. O., Okereke, C., Pradhan, P., Raven, R., Sun, Y., Vijge, M. J., Van Vuuren, D., & Wicke, B. (2022). *Scientific evidence on the political impact of the Sustainable Development Goals. Nature Sustainability, 5(9), 795–800.* https://doi.org/10.1038/s41893-022-00909-5

Budiyono, B., Matin, H. H. A., Yasmin, I. Y., & Priogo, I. S. (2022). *Effect of Pretreatment and C/N Ratio in Anaerobic Digestion on Biogas Production from Coffee Grounds and Rice Husk Mixtures. International Journal of Renewable Energy Development, 12(1), 209–215*. https://doi.org/10.14710/ijred.2023.49298

Campos, G. a. F., Sagu, S. T., Celis, P. S., & Rawel, H. M. (2020). *Comparison of batch and continuous Wet-Processing of coffee: changes in the main compounds in beans, By-Products and wastewater. Foods, 9(8), 1135.* https://doi.org/10.3390/foods9081135

Caracterización del café y subproductos en el Municipio de Pauna Boyacá en 2023 (Trabajo de grado). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Repositorio UPTC. Rivera García, V., & Arévalo Vega, D. M. (2023). https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/f1e21919-8668-49e6-bba5-2999b1144591/content

Carmen, M., Lorena, Z., Alexander, V., Amandio, V., & Raúl, S. (2020). *Coffee Pulp: An Industrial By-product with Uses in Agriculture, Nutrition and Biotechnology. Reviews in Agricultural Science, 8(0), 323–342*. https://doi.org/10.7831/ras.8.0_323

Chen, X., Zhang, X., Sun, C., Chen, Y., Xi, Z., Ma, G., Zhang, T., Zhang, Y., Zhou, X., Li, Y., & Kong, Z. (2024*). New insights into anaerobic digestion of lignocellulosic wastes towards carbon neutrality: A review of current advancement and future prospects. Journal of Water Process Engineering, 68, 106584*. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106584

Composición microbiana del proceso de fermentación del café producido en el departamento del Cesar. (2025). https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=udes_microorganismos_cenicafe

Córdova-Mosquera, R. A., Morales-Paredes, C. A., Pérez-Almeida, I. B., Saquete, M. D., Boluda-Botella, N., Oliva-Merencio, D., Pais-Chanfrau, J., Rodríguez-Díaz, J. M., & Pereda-Reyes, I. (2025). *Sustainable wastewater treatment through anaerobic digestion in the instant coffee industry: A Techno-Economic and Environmental Assessment. Water, 17(22), 3207*. https://doi.org/10.3390/w17223207

Czekała, W., Łukomska, A., Pulka, J., Bojarski, W., Pochwatka, P., Kowalczyk-Juśko, A., Oniszczuk, 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

Deterioration pattern of six biodegradable, potentially low-environmental impact mulches in field conditions. Journal Of Environmental Management, 200, 490-501. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.007

De La Luz Cádiz-Gurrea, M., Fernández-Ochoa, Á., Leyva-Jiménez, F. J., Guerrero-Muñoz, N., Del Carmen Villegas-Aguilar, M., Pimentel-Moral, S., Ramos-Escudero, F., & Segura-Carretero, A. (2020). LC-MS and Spectrophotometric *Approaches for Evaluation of Bioactive Compounds from Peru Cocoa By-Products for Commercial Applications. Molecules, 25(14), 3177.* https://doi.org/10.3390/molecules25143177

Del Prete, S., & Pagano, M. (2024). *Enzyme inhibitors as multifaceted tools in medicine and agriculture. Molecules, 29(18), 4314.* https://doi.org/10.3390/molecules29184314

Diniz, B. C., Wilfert, P., Sorokin, D. Y., & Van Loosdrecht, M. C. (2025). *Anaerobic digestion at high-pH and alkalinity for biomethane production: Insights into methane yield, biomethane purity, and process performance. Bioresource Technology, 429, 132505.* https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132505

Du, B., Hou, H., Xu, H., & Zhang, M. (2023). *How to solve the problem of irregular recycling of spent lead-acid batteries in China? ——An analysis based on evolutionary game theory. Journal of Cleaner Production, 421, 138514.* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138514

Eftaxias, A., Kolokotroni, I., Michailidis, C., Charitidis, P., & Diamantis, V. (2024).*Techno-Economic Assessment of anaerobic digestion technology for Small- and Medium-Sized Animal Husbandry Enterprises. Applied Sciences, 14(11), 4957.* https://doi.org/10.3390/app14114957

Effects of coffee processing residues on anaerobic microorganisms and corresponding digestion performance. Bioresource Technology, 245(Pt A), 714–723. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.098

Ecological Engineering and Environment Protection, 2025(2/2025), 20. https://doi.org/10.32006/eeep.2025.2.2043

Elena, J. P., Ding, F., Fermoso, F. G., & Francisco, G. M. J. (n.d.*). Monitoring of volatile fatty acids during anaerobic digestion of olive pomace by means* of a hand held near infrared spectrometer. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4921115

Estadísticas Cafeteras - Federación Nacional de Cafeteros. (2025, October 21). *Federación Nacional De Cafeteros*. https://federaciondecafeteros.org/wp/estadisticascafeteras .

Fernández-Cortés, Y., Sotto-Rodríguez, K. D., & Vargas-Marín, L. A. (2020b). *Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. Producción + Limpia, 15(1), 93-110.* https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a7

Gonzalez-Piedra, S., Hernández-García, H., Perez-Morales, J. M., Acosta-Domínguez, L., Bastidas-Oyanedel, J., & Hernandez-Martinez, E. (2021). *A Study on the Feasibility of Anaerobic Co-Digestion of Raw Cheese Whey with Coffee Pulp Residues. Energies, 14(12), 3611*. https://doi.org/10.3390/en14123611

Gómez-Salcedo, Y., Baquerizo-Crespo, R. J., Da Silva, A. J., Oliva-Merencio, D., & Pereda-Reyes, I. (2021b). *DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUALES SÓLIDOS DEL BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ. Revista Internacional De Contaminación Ambiental.* https://doi.org/10.20937/rica.53753

Gamez, M. J. (2022b, mayo 24). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible. Desarrollo Sostenible.* https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenibl

Gil-Gómez, J. A., Florez-Pardo, L. M., & Leguizamón-Vargas, Y. C. (2024). *Valorizationof coffee by-products in the industry, a vision towards circular economy. Discover Applied Sciences, 6(9).* https://doi.org/10.1007/s42452-024-06085-9

González, V. F. D. (2019). *Estudio de la viabilidad para la revaloración de los desechos del café y su aplicación industrial.* https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/col85/article/view/1266/1444

Han, L., Li, L., Huang, J., Ye, W., Liu, Y., Zhan, B., Gu, Y., & Peng, X. (2026). *Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A critical review of inhibition mechanisms and mitigation strategies. Journal of Environmental Management, 403, 129236.* https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.129236

Hao, X., Salhi, I., Laghrouche, S., Amirat, Y. A., & Djerdir, A. (2023). Multiple inputs multi-phase interleaved boost converter for fuel cell systems applications. Renewable Energy, 204, 521–531. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.021 He, K., Liu, Y., Tian, L., He, W., & Cheng, Q. (2024). *Review in anaerobic digestion of food waste. Heliyon, 10(7), e28200.* https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28200

Hernández-Varela, J. D., & Medina, D. I. (2023). *Revalorization of Coffee Residues: Advances in the Development of Eco-Friendly Biobased Potential Food Packaging. Polymers, 15(13), 2823*. https://doi.org/10.3390/polym15132823 https://federaciondecafeteros.org/static/files/8Capitulo6.pdf

Hydraulic retention time regulation for anaerobic fermentation: Focus on volatile fatty acids production/distribution, microbial community succession and interactive correlation. Bioresource Technology, 347, 126310. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126310

Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. PML, 15(1). http://www.scielo.org.co/scielo.php

K. F., Kassahun, S. K., & Angelidaki, I. (2024). *Coffee processing waste: Unlocking opportunities for sustainable development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 210, 115263.* https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115263

Karki, R., Surendra, K., Skerlos, S., Raskin, L., & Khanal, S. K. (2025). *Anaerobic co-digestion as a strategy for treating coffee Pulp: Insights into process performance. Bioresource Technology, 442, 133650.* https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133650

Krishnaraj, C., Radhakrishnan, S., Ramachandran, R., Ramesh, T., Kim, B., & Yun, S. (2022). *In vitro toxicological assessment and biosensing potential of bioinspired chitosan nanoparticles, selenium nanoparticles, chitosan/selenium nanocomposites, silver nanoparticles and chitosan/silver nanocomposites Chemosphere, 301, 134790.* https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134790

Kumar, D. P., Mishra, R. K., Chinnam, S., Binnal, P., & Dwivedi, N. (2024). *A comprehensive study on anaerobic digestion of organic solid waste: A review on configurations, operating parameters, techno-economic analysis and current trends. Biotechnology Notes, 5, 33–49*. https://doi.org/10.1016/j.biotno.2024.02.001

Lai, S., Cheng, C., Yuan, B., Liao, Y., Su, X., & Bai, S. (2023). *Mechanochemical reclaiming and thermoplastic re-processing of waste Acrylonitrile-butadiene rubber (NBR)/poly (Vinyl Chloride) (PVC) insulation materials. Waste Management, 158, 153–163*. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.019

Lasso, L. C., Ueno–Fukura, M., Jiménez–Moreno, Y., Suárez–Contento, L., & Aya–Baquero, E. (2022b). *Establecimiento de biofloc a tres relaciones carbono/nitrógeno, tendiente a la producción de zooplancton. Revista De La Facultad De Medicina Veterinaria Y De Zootecnia, 69(3).* https://doi.org/10.15446/rfmvz.v69n3.99968

Londoño Espinosa, H. D. (2017). *Aprovechamiento de pulpa de café para la producción de biogás en un reactor flujo pistón [Tesis de maestría, Universidad Pontificia Bolivariana]. Repositorio Institucional UPB.* https://repository.upb.edu.co/server/api/core/bitstreams/105bf304-41d4-404c-9e47-822a07b0246d/content

López, P. L. (2004). *POBLACIÓN MUESTRA Y MUESTREO.* Punto Cero, 09(08), 69–74. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-

Lourenço, V. A., Camargo, F. P., Sakamoto, I. K., Silva, E. L., & Varesche, M. B. A. (2024). *Waste valorization through anaerobic co-digestion in coffee and swine farms: CH4 yield optimization and farm-scale viability. Bioresource Technology, 415, 131667*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131667

Malatesta, T., Morrison, G. M., Breadsell, J. K., & Eon, C. (2023). *A Systematic Literature Review of the Interplay between Renewable Energy Systems and Occupant Practices. Sustainability, 15(12), 9172*. https://doi.org/10.3390/su15129172

Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). *A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(10), 2224.* https://doi.org/10.3390/ijerph15102224

Mensah, J. (2019). *Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. Cogent Social Sciences, 5(1).* https://doi.org/10.1080/23311886.2019.1653531

Morales, R. A. (2018). *Estudio del efecto de la cascarilla de café en el proceso de combustión de carbón para reducir las emisiones de NOx mediante el proceso de reburn*. https://revia.areandina.edu.co/index.php/Cc/article/view/1212?utm

Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). *Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, 540–555.* https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032

Neuner, T., Meister, M., Pillei, M., Senfter, T., Draxl-Weiskopf, S., Ebner, C., Winkler, J., & Rauch, W. (2024). *Impact of design and mixing strategies on biogas production in anaerobic digesters. Water, 16(15), 2205*. https://doi.org/10.3390/w16152205

Passos, F., Cordeiro, P. H. M., Baeta, B. E. L., De Aquino, S. F., & Perez-Elvira, S. I. (2017). *Anaerobic co-digestion of coffee husks and microalgal biomass after thermal hydrolysis. Bioresource Technology, 253, 49–54.* https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.071

Peralta, P. (2023, 30 mayo). *Conozca las cifras más relevantes de la caficultura en Colombia. Comité de Cafeteros de Antioquia.* https://fncantioquia.org/conozca-las-cifras-mas-relevantes-de-la-caficultura-encolombia.

Pilarska, A. A., Kulupa, T., Kubiak, A., Wolna-Maruwka, A., Pilarski, K., & Niewiadomska, A. (2023). *Anaerobic Digestion of Food Waste—A Short review. Energies, 16(15), 5742.* https://doi.org/10.3390/en16155742

Pongsiriyakul, K., Wongsurakul, P., Kiatkittipong, W., Premashthira, A., Kuldilok, K., Najdanovic-Visak, V., Adhikari, S., Cognet, P., Kida, T., & Assabumrungrat, S. (2024). *Upcycling coffee waste: key industrial activities for advancing circular economy and overcoming commercialization challenges. Processes, 12(12), 2851.* https://doi.org/10.3390/pr12122851

Revisiones sobre energías renovables y sostenibles | Revista | ScienceDirect.com por Elsevier. (2025.). https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-and-sustainable-energy-reviews

Rodríguez Valencia, N., Sanz Uribe, J.R., Oliveros Tascon, C.E. y Ramírez Gómez, C.A.(2015) *Prácticas y estrategias para el ahorro, uso eficiente del agua y control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café. En. S.M. Marin. Federación Nacional de Cafeteros. Beneficio del café en Colombia. Comité editorial Cenicafe*. https://www.cenicafe.org/es/publications/Beneficio-del-cafe-enColombia.pdf

Rodriguez-Quiroz, E. S., Olivares-Xometl, O., Santacruz-Vázquez, V., Santacruz-Vázquez, C., Arellanes-Lozada, P., & Rubio-Rosas, E. (2023). *Production of Cellulosic Microfibers from Coffee Pulp via Alkaline Treatment, Bleaching and Acid Hydroly sis. Materials, 16(24), 7607*. https://doi.org/10.3390/ma16247607

Ruiz, J. a. H., & Carrillo, C. a. C. (2021). *Diseño de un prototipo para el control del secado solar de café.*

https://fupvirtual.edu.co/repositorio/files/original/2fe5e485cbbcf15ce74a6a633041cfade11afa68.pdf?.

Sumardiono, S., Jos, B., Dewanti, A. a. E., Mahendra, I., & Cahyono, H. (2021b). *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

Shah, S. V., Lamba, B. Y., Tiwari, A. K., & Chen, W. (2024). *Sustainable biogas production via anaerobic digestion with focus on CSTR technology: A review. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 162, 105575.* https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105575

Shoshaa, R., Ghanimeh, S., & Almomani, F. (2024). *Recent advances in plug flow reactors for anaerobic digestion and in-depth evaluation of mixing approaches: A review. Fuel, 377, 132711*. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132711

Sugebo, B. (2022). *A review on enhanced biofuel production from coffee by-products using different enhancement techniques. Materials for Renewable and Sustainable Energy, 11(2), 91–103*. https://doi.org/10.1007/s40243-022-00209-0

Sun, S., Wang, X., Cheng, S., Lei, Y., Sun, W., Wang, K., & Li, Z. (2024). *A review of volatile fatty acids production from organic wastes: Intensification techniques and separation methods. Journal of Environmental Management, 360, 121062.* https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121062

Tech4plus.com. (2025.). *Digestión anaerobia - teCH4+. 2025.* https://tech4plus.com/digestion-anaerobia/

Vanegas, A. A. R., Vásquez, J. E., Delgado, J. M., Domínguez-Carvajal, D., Mosquera-Mena, A. M., Molina, F., & Peñuela-Vásquez, M. (2023). Evaluation of Potential

Substrates for Biogas Production in Colombia using Anaerobic Digestion Systems. Ingeniería E Investigación, 43(2), e100834. https://doi.org/10.15446/ing.investig.100834

Vázquez, H. J., & Dacosta, O. (2007). Fermentación alcohólica: *Una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas. Ingeniería Investigación Y Tecnología, 8(4), 249–259.* https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2007.08n4.020

Venkatesh, G. (2021). Circular Bio-economy—Paradigm for the Future: Systematic Review of Scientific Journal Publications from 2015 to 2021. *Circular Economy and Sustainability, 2(1), 231–279*. https://doi.org/10.1007/s43615-021-00084-3

Villar, J., Huaman, I. P. R., Bazán, D. L., Hilares, R. T., & De Cássia Lacerda Brambilla Rodrigues, R. (2026). *Hydrothermal–Membrane valorization of coffee pulp for xylooligosaccharide production. Processes, 14(1), 153.* https://doi.org/10.3390/pr14010153

Widjaja, T., Nurkhamidah, N., Altway, A., Iswanto, T., & Grady, E. (2021). *Performance of Biogas Production from Coffee Pulp Waste with Cow Dung and Cattle Rumen Fluid as Inoculum in a Batch Reactor. Advances in Engineering Research/Advances in Engineering Research*. https://doi.org/10.2991/aer.k.210603.045

Yang, T. S., Flores-Rodriguez, C., Torres-Albarracin, L., & Da Silva, A. J. (2024). Thermochemical pretreatment for improving the psychrophilic anaerobic digestion of coffee husks. *Methane*, *3*(2), 214–226. https://doi.org/10.3390/methane3020013

Yang, J., Zhang, J., Du, X., Gao, T., Cheng, Z., Fu, W., & Wang, S. (2024). *Ammonia inhibition in anaerobic digestion of organic waste: a review. International Journal*

of Environmental Science and Technology. https://doi.org/10.1007/s13762-024-06029-1

Zhang, X., Jiao, P., Zhang, M., Wu, P., Zhang, Y., Wang, Y., Xu, K., Yu, J., & Ma, L. (2023). *Impacts of organic loading rate and hydraulic retention time on organics degradation, interspecies interactions and functional traits in thermophilic anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge. Bioresource Technology, 370, 128578*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128578

Zheng, X., & Li, R. (2024). *Critical Review on Two-Stage Anaerobic Digestion with H2 and CH4 Production from Various Wastes. Water, 16(11), 1608.* https://doi.org/10.3390/w16111608.