



**Propuesta de un Sistema de Generación de Biogás a Partir de Biomasa Residual de Açaí  
para Comunidades Agroindustriales del Guaviare**

Paula Andrea Barahona Garzón

Erika Esmeralda Agudelo Rivera

Universidad EAN

Facultad de ingeniería

Ingeniería química

Bogotá D.C, Colombia

2025-2

**Propuesta de un Sistema de Generación de Biogás a Partir de Biomasa Residual de Açai  
para Comunidades Agroindustriales del Guaviare**

**Paula Andrea Barahona Garzón**

**Erika Esmeralda Agudelo Rivera**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Químico

Directora:

Marie José Chery Leal

Universidad EAN

Facultad de ingeniería

Ingeniería química

Bogotá D.C, Colombia

2025-2

## Tabla de contenido

RESUMEN .....	6
ABSTRACT .....	7
INTRODUCCIÓN .....	8
OBJETIVOS .....	10
Objetivo General .....	10
Objetivos Específicos.....	10
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	11
JUSTIFICACIÓN .....	13
ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS .....	15
Requerimientos Funcionales .....	16
MARCO DE REFERENCIA .....	22
Contexto Energético en Zonas Rurales de Colombia.....	23
Pobreza Energética en Colombia.....	23
Cobertura Eléctrica Rural y Situación en el Guaviare.....	25
Energías Renovables y Transición Energética .....	26
Tipos de Energías Renovables.....	26
Bioenergía como Alternativa para Zonas Rurales.....	29
Características del Fruto de Açai .....	30
Biomasa Residual de Açai como Recurso Energético.....	30

Composición Fisicoquímica de las Semillas y la Fibras de Açai .....	31
Digestión Anaerobia y Producción de Biogás.....	32
Principios del Proceso de Digestión Anaerobia .....	32
Factores que Influyen en la Digestión Anaerobia .....	33
Composición del Biogás y Contextos Rurales .....	34
Digestato.....	35
Impacto del Digestato en los Suelos.....	36
Aplicación de Digestato en Cultivos .....	37
Economía Circular.....	38
Biogás y Economía Circular.....	38
Beneficios económicos y ambientales del biogás y biofertilizante .....	39
METODOLOGÍA .....	40
Enfoque de la Investigación .....	40
Alcance de la Investigación.....	40
Diseño de la Investigación .....	41
Etapas de Investigación.....	42
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	46
Caracterización de propiedades fisicoquímicas de biomasa residual.....	46
Caracterización del residuo de palmito como sustrato comparativo.....	47
Resultados de la caracterización fisicoquímica.....	49

Potencial Máximo teórico de producción de biogás .....	50
Establecimiento de la relación sustrato-inóculo y evaluación de potencial de producción de biogás.....	51
Evaluación del potencial de producción de biogás .....	53
Caracterización del proceso productivo del açai desde la perspectiva de un experto...	56
Análisis de la viabilidad técnica y económica del sistema.....	58
Viabilidad económica.....	60
Oportunidades de valorización tecnológica del residuo de açai .....	66
CONCLUSIONES .....	68
REFERENCIAS.....	70

## RESUMEN

En este proyecto se aborda la problemática del acceso limitado a la energía en zonas rurales apartadas del departamento del Guaviare, donde las comunidades y las agroindustrias enfrentan restricciones en su desarrollo debido a la dependencia de combustibles fósiles y la falta de infraestructura eléctrica. El departamento actualmente presenta un crecimiento de producción de açai, no obstante, esta actividad genera grandes volúmenes de residuos agroindustriales, siendo los principales desechos de semillas y fibras, que carecen de gestión adecuada y representan un problema ambiental, pero que poseen potencial energético y agronómico.

El objetivo de estudio es analizar el desempeño de la biodigestión anaerobia a partir de biomasa residual de açai, con el fin de determinar su viabilidad técnica y su potencial para generar biogás como fuente alternativa de energía para comunidades rurales. Para ello, se partió de la caracterización fisicoquímica de la biomasa residual con el propósito de estimar su potencial de producción de biogás. La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, integrando el análisis del contexto social y ambiental con una metodología experimental a escala laboratorio. Inicialmente, se realizó la caracterización fisicoquímica de los residuos para estimar su potencial energético, posteriormente se realizaron ensayos de digestión anaerobia en biodigestores controlados, analizando variables tales como producción y composición del biogás y eficiencia de conversión. Por último, se llevó a cabo una evaluación técnica y económica preliminar del sistema, con el fin de establecer su eficiencia y proyección de implementación en zonas rurales del Guaviare.

Los resultados obtenidos evidencian diferencias significativas en el comportamiento de los sustratos evaluados durante la digestión anaerobia ya que se usaron residuos de palmito como sustrato comparativo. El residuo de palmito presentó mejores condiciones fisicoquímicas, con

mayor contenido de sólidos volátiles y humedad, lo que se tradujo en una mayor biodegradabilidad y en una producción acumulada de metano considerablemente superior frente al residuo de açai. En contraste, el açai mostro una baja fracción biodegradable asociada a su alta composición lignocelulósica, limitando su rendimiento como generador de biogás sin pretratamientos previos. Asimismo, se observó que el tipo de inóculo influyó de manera determinante en el proceso, siendo el estiércol de cerdo el que permitió una producción de metano más estable y eficiente en comparación con los lodos de PTAR. Finalmente, la relación sustrato-inóculo de 1:1 se identificó como la condición más favorable, al lograr una mejor sincronización entre la disponibilidad de materia orgánica y la actividad microbiana, maximizando el rendimiento del proceso.

### **ABSTRACT**

Limited Access to energy in remote rural areas of the Guaviare department represents a significant constraint on social and productive development, primarily due to dependence on fossil fuels and insufficient electrical infrastructure. Simultaneously, the growing production of acai has generated large volumes of agro-industrial waste, mainly seeds and fibers, which lack adequate management and pose environmental challenges despite their significant energy potential. This study aims to evaluate the performance of anaerobic digestion of residual acai biomass to determine its technical feasibility and potential for biogas production as an alternative energy source for rural communities. The research was conducted using a mixed-methods approach with a correlational scope and a laboratory-scale experimental design. The methodology was structured in three stages: physicochemical characterization of the residual biomass, experimental evaluation of biogas production under controlled anaerobic digestion

conditions and a preliminary analysis of technical and economic feasibility. Key variables such as biogas volume and methane content were analyzed. The results demonstrate the energy potential of acai waste and support anaerobic biodigestión as a sustainable strategy for waste valorization, renewable energy generation, and future implementation in rural contexts.

**Key words:** Biogás, biomasa residual, açai, digestión anaerobia, economía circular, Guaviare.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, muchas zonas rurales, particularmente aquellas ubicadas en regiones con alta biodiversidad como el departamento del Guaviare, enfrentan limitaciones estructurales significativas para el acceso a fuentes de energía confiables, sostenibles y asequibles. Estas limitaciones no solo obstaculizan el desarrollo productivo de las comunidades, sino que también inciden negativamente en la competitividad de las micro, pequeñas y medianas empresas (MiPymes) rurales, dificultando su autonomía energética, el procesamiento agroindustrial y la generación de valor agregado a partir de productos locales (Canchila Benítez et al., 2022).

En este contexto, la transición hacia fuentes de energías renovables representa una necesidad urgente y estratégica. La integración de tecnologías como los biodigestores anaerobios, adaptadas a las condiciones de las comunidades rurales, surge como una alternativa viable para enfrentar estos retos. Este tipo de solución no solo permiten aprovechar los recursos naturales disponibles localmente, sino que también promueven el cierre de ciclos mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos, generando productos energéticos (biogás) y subproductos valiosos como el digestato, el cual puede ser utilizado como biofertilizante en sistemas agrícolas sostenibles (Biodigestores: Innovación sostenible para la agricultura y ganadería, 2024).

Dentro de este enfoque, se encuentra la biomasa residual del fruto de açai (*Euterpe Oleracea*), proveniente de un cultivo de alto potencial y creciente interés económico, social y ambiental en la región amazónica colombiana. En el procesamiento del fruto, especialmente en actividades de extracción de pulpa para bebidas y alimentos, se generan entre un 60 % y 80 % de residuos, compuestos principalmente por semillas y fibras, que actualmente no tienen un destino adecuado, representando un problema ambiental persistente. Sin embargo, estos residuos poseen características fisicoquímicas que los hacen potencialmente aptos para ser utilizados como sustrato en procesos de digestión anaerobia, permitiendo así su valorización energética y agronómica mediante la obtención de biogás (García-Vallejo et al., 2023).

El presente proyecto tiene como objetivo principal evaluar, a escala de laboratorio, un sistema de generación de energía mediante biodigestión anaerobia a partir de biomasa residual de açai. La investigación busca analizar el desempeño del sistema bajo condiciones controladas y determinar la viabilidad técnica del modelo como alternativa para fortalecer la autonomía energética y la sostenibilidad del proyecto MiPymes en zonas rurales del Guaviare.

Así mismo, el trabajo incluye la caracterización fisicoquímica del sustrato, y el diseño del sistema. Se contempla una evaluación preliminar del sistema desde una perspectiva técnica y operativa, complementada con recomendaciones orientadas a su escalabilidad, considerando factores sociales, económicos y ambientales propios del territorio. Con ello, se pretende no solo aportar al desarrollo de soluciones energéticas sostenibles, sino también impulsar la economía circular, optimizar el uso de recursos locales y fortalecer las capacidades productivas de las comunidades rurales.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Proponer un sistema de biodigestión anaerobia alimentado con biomasa residual de la producción de açai, con el fin de determinar su potencial como alternativa energética y de valorización agronómica para comunidades rurales del departamento del Guaviare.

### **Objetivos Específicos**

- Determinar las propiedades fisicoquímicas de la biomasa residual de açai, para evaluar su idoneidad como sustrato en procesos de digestión anaerobia.
- Establecer el potencial de producción de biogás obtenido de la biodigestión de los residuos de açai a partir de la medición del rendimiento energético.
- Evaluar la viabilidad técnica del proceso de digestión anaerobia de la biomasa residual de açai mediante el análisis de su eficiencia de producción de biogás y calidad del gas generado bajo condiciones controladas.
- Analizar la viabilidad económica preliminar del sistema de generación de biogás a partir de residuos de açai, considerando costos de implementación, operación y mantenimiento, así como indicadores financieros que permitan estimar su factibilidad en comunidades rurales.

## **DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

En Colombia, el acceso a la electricidad sigue siendo profundamente desigual. Mientras que en áreas urbanas la cobertura supera el 99%, en zonas rurales alrededor del 13% de los hogares aún no tienen acceso a energía eléctrica y en departamentos como La Guajira, Vaupés, Vichada; Amazonas, Putumayo, Guainía y Guaviare apenas entre el 32% y el 74% de los hogares están conectados al servicio. Aún en zonas con cobertura, el servicio suele presentar intermitencias y baja calidad, especialmente en localidades de difícil acceso al sistema Interconectado Nacional (Esquivel García & Toro-García, 2024).

Este déficit energético tiene implicaciones graves: en las zonas rurales la pobreza energética afecta al 48 % de la población, frente a un 4,3 % en zonas urbanas (IMPE, s. f.). Las comunidades aisladas están obligadas a depender de combustibles tradicionales como la leña o generadores diésel, lo que contribuye a la deforestación, genera daños a la salud domiciliaria y limita el desarrollo productivo. En este contexto, el árbol de problemas de la Figura 1, permite visualizar de manera estructurada las causas, la problemática central y las consecuencias asociadas a la falta de acceso confiable y sostenible a la energía en las comunidades rurales del Guaviare, destacando además el papel de la gestión ineficiente de los residuos del fruto de açaí como un factor que agrava la situación ambiental de la región.

**Figura 1.**

*Árbol de Problemas*



*Nota.* El esquema presenta las causas, la problemática central y las consecuencias asociadas al limitado acceso a energía y al desaprovechamiento de biomasa residual. Elaboración propia.

En paralelo, el departamento del Guaviare se ha consolidado como un productor en crecimiento de açai (*Euterpe Oleracea*). En 2020, más de 175 familias campesinas recolectaron alrededor de 400 toneladas de este fruto, cuyo procesamiento genera entre un 60 % y 80 % de residuos, principalmente semillas y fibra (Ministerio de ambiente, 2020). Estos subproductos, al carecer de un manejo adecuado, representan un pasivo ambiental, pero al mismo tiempo constituyen un recurso subutilizado con potencial energético y agronómico.

En este escenario, se hace evidente la urgencia de soluciones que permitan reducir la brecha energética en comunidades rurales y, simultáneamente, gestionen de manera sostenible los residuos agroindustriales del açai. La digestión anaerobia aparece como una alternativa

estratégica, ya que posibilita la generación de biogás como fuente energética renovable y el aprovechamiento del digestato como biofertilizante, lo que favorece la implementación de estrategias orientadas a la economía circular. De este modo, abordar la problemática desde un enfoque integral no solo busca mitigar los impactos ambientales y sociales, sino también fortalecer la autonomía energética, mejorar la productividad agroindustrial y aportar al desarrollo sostenible del Guaviare.

## **JUSTIFICACIÓN**

Actualmente, en Colombia persiste un importante desafío para garantizar el suministro de energía eléctrica en regiones apartadas, como el departamento del Guaviare. Esta zona, reconocida por su alta biodiversidad, enfrenta limitaciones significativas para acceder a fuentes de energía confiables, especialmente en sus áreas rurales. En este contexto, las micro, pequeñas y medianas empresas (MiPymes) de la región, orientadas principalmente a la actividad agroindustrial ven restringido su desarrollo productivo debido a los altos costos de la energía, la dependencia de combustibles fósiles y la falta de infraestructura energética adecuada. Según la Federación Colombiana de Ganaderos (FEDEGAN), las tarifas de energía eléctrica en el país pueden ser entre un 40 % y 60 % más altas que en otras naciones de la región, lo que afecta directamente la competitividad del sector rural (FEDEGAN, 2018). Asimismo, un estudio reciente reportó que el costo promedio del kilovatio-hora (kWh) en el sector empresarial aumentó de \$ 771 a \$ 922 entre junio de 2023 y junio de 2024, evidenciando un incremento del 32 % en el precio de la energía eléctrica en el país («Costo de la energía eléctrica se ha incrementado hasta 32 % en las empresas del país: alarma en el sector privado», 2024).

De este modo, el aprovechamiento de residuos agroindustriales surge como una oportunidad estratégica para avanzar hacia un modelo energético más sostenible y adaptado a las condiciones locales.

Este proyecto plantea valorizar los residuos agroindustriales del departamento del Guaviare mediante su conversión en energía térmica a través de digestores anaerobios. Esta tecnología permite transformar materia orgánica en biogás, un combustible renovable que puede sustituir parcialmente el uso de combustibles fósiles, contribuyendo así a la reducción de emisiones contaminantes y al aprovechamiento energético de los desechos orgánicos (Agriculture and Natural Resources, 2018). Además, este proceso promueve la economía circular al reincorporar subproductos agroindustriales en el ciclo productivo como recursos energéticos útiles para la comunidad y el sector productivo (Equipe GNPW Group, 2024).

La implementación de este modelo de generación energética tendría impactos positivos en tres dimensiones principales:

- **Reducción Ambiental:** Los digestores anaerobios permiten capturar el metano que normalmente se liberaría a la atmósfera, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero y evitando la contaminación del suelo y del agua (United States Environmental Protection Agency, 2025). Adicionalmente, la conversión de residuos en biogás y biofertilizantes reduce la presión sobre los ecosistemas locales al sustituir parcialmente los fertilizantes minerales convencionales (Seruga et al., 2022).
- **Beneficio Económico:** La digestión anaerobia favorece la diversificación de ingresos en zonas rurales, permitiendo a las agroindustrias transformar residuos en una fuente adicional de energía y disminuir sus costos operativos asociados al manejo y disposición

de desechos (More, 2018). Asimismo, la generación de energía en sitio y el aprovechamiento de subproductos incrementan la competitividad regional y agregan valor a las cadenas productivas (ST Green Power, 2024).

- **Impacto Social:** Este modelo energético puede mejorar la calidad de vida en comunidades rurales mediante la creación de nuevos empleos, el fortalecimiento de la economía local y la promoción de prácticas sostenibles de gestión de residuos. Además, la implementación de sistemas de digestión anaerobia en zonas rurales impulsa el desarrollo comunitario al generar oportunidades económicas y fomentar la autosuficiencia energética (United States Environmental Protection Agency., 2025).

En resumen, este proyecto representa una alternativa innovadora, replicable y sostenible para impulsar el desarrollo rural del Guaviare mediante el aprovechamiento de sus propios recursos orgánicos. Su adopción contribuiría directamente a la transición hacia una bioeconomía más inclusiva, resiliente y alineada con los principios de sostenibilidad y economía circular (Mendieta et al., 2021).

## ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

Desde la fase inicial, se ha delimitado el alcance, cuyo propósito central es evaluar la viabilidad técnica y realizar una evaluación económica preliminar de un biodigestor anaerobio alimentado con biomasa residual de la producción de açaí, con el fin de determinar su potencial como alternativa energética y de valorización agronómica para comunidades rurales del departamento del Guaviare.

Para el diseño experimental se utiliza como materia prima biomasa residual de açaí (semillas y fibra) proveniente de agroindustrias locales, inóculo (lodo o sustrato activo) para

pruebas PBM (Potencial Bioquímico de Metano) o arranque del digestor y agua, reactivos y material de pretratamiento (molienda, tamizado). El análisis se basará en variables críticas como:

- Temperatura del proceso (mesófila o termófila según selección experimental).
- pH del medio.
- Relación inóculo vs Residuo de Açaí. Se analizan las relaciones de inóculo utilizando dos tipos de sustrato: estiércol de cerdo y lodos de la PTAR de la Calera. Para el estiércol de cerdo se evalúan las proporciones 1:1 y 1:2, mientras que para los lodos de PTAR únicamente se analiza la relación 1:1.
- Volumen de biogás diario ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ).
- Sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV).

Estos parámetros permitirán determinar el rendimiento del biodigestor bajo condiciones controladas y su potencial integración con la generación fotovoltaica en un esquema híbrido.

### **Requerimientos Funcionales**

Corresponden a las funciones que el sistema debe cumplir para alcanzar los objetivos del proyecto:

- Recepción, pretratamiento de reducción de tamaño a 850 micras, y carga de biomasa residual de açaí en el biodigestor.
- Producción y medición de biogás a escala experimental (registro diario de volumen producido).
- Análisis fisicoquímicos estándar (horno para ST/SV, análisis elemental).
- Registro y trazabilidad de datos (hojas de recolección y base de datos simple).

- Evaluación de la eficiencia energética y potencial agroindustrial.
- Requerimientos No Funcionales

Son las condiciones y restricciones que debe cumplir el sistema para garantizar su operación y viabilidad:

- Seguridad en la manipulación del biogás y de biomasa (ventilación, control de fuentes de ignición, extintores adecuados).
- Cumplimiento de normativas ambientales y de seguridad industrial aplicables en Colombia (normas generales de seguridad de laboratorio y manejo de residuos).
- Uso de materiales y componentes de bajo costo y fácil acceso cuando se proponga la proyección.
- Documentación clara y reproducible (protocolos, fichas técnicas y registros de muestreo).
- Mantenimiento y operación sencillos para facilitar transferencia tecnológica a comunidades.

## **ANÁLISIS DE RESTRICCIONES**

El análisis de restricciones constituye una etapa fundamental en la planeación de la investigación, ya que permite identificar las condiciones mínimas necesarias para el desarrollo del proyecto y garantizar la coherencia entre los objetivos, el diseño metodológico y los resultados esperados. En la Tabla 1 se resumen las restricciones identificadas para la investigación, las cuales direccionan la ejecución experimental y la posterior evaluación de los resultados.

**Tabla 1.***Análisis de restricciones*

	Restricción Identificada	Estrategias
Restricciones Legales Y Normativas	El proyecto debe cumplir con la normatividad colombiana en materia ambiental y energética, garantizando el adecuado manejo los residuos orgánicos, el control de las emisiones atmosféricas y el cumplimiento de las regulaciones asociadas al uso de biodigestores.	Reconocer y aplicar la normativa vigente desde la etapa de diseño, para una implementación futura en el territorio del Guaviare. Entre las disposiciones aplicables se encuentra la Ley 1715, 2014, la cual establece que la generación, conexión y comercialización de energía proveniente de fuentes no convencionales de energía (FNCE), como el biogás, debe ajustarse a los requerimientos técnicos, ambientales y económicos definidos por el ministerio de minas y energía (MME), la comisión de regulación de energía y gas (CREG) y las autoridades ambientales. Asimismo, la RESOLUCIÓN 240 de 2016 reglamenta el uso del biogás y el biometano en el servicio público domiciliario de gas combustible, permitiendo su comercialización como fuente de energía renovarle y definiendo los parámetros de calidad y seguridad para su utilización tanto en hogares como en la industria.

<p>Restricciones Técnicas</p>	<p>En la implementación del biodigestor, se deben considerar varias restricciones técnicas. Entre ellas se encuentra la disponibilidad del espacio físico adecuado para la instalación del sistema, así como la adquisición de los equipos necesarios y la posible necesidad de capacitación especializada para su correcta operación. Adicionalmente, la variabilidad en la disponibilidad de residuos de açaí podría afectar la continuidad del proceso. Finalmente, las condiciones ambientales, especialmente la temperatura, pueden influir en la eficiencia del biodigestor y representan otra potencial limitación técnica.</p>	<p>Para garantizar la correcta implementación del biodigestor, se plantean estrategias orientadas a mitigar las posibles limitaciones técnicas. Entre ellas se destaca la selección de un diseño modular que se adapte al espacio disponible y la adquisición de equipos con soporte técnico local, junto con un plan de mantenimiento preventivo. Asimismo, se propone capacitar al personal encargado de la operación para asegurar un manejo seguro y eficiente del sistema. Finalmente, se plantea proteger y monitorear el biodigestor frente a las condiciones ambientales, principalmente la temperatura, para mantener un rendimiento óptimo del proceso</p>
<p>Restricciones Económicas Y Financieras</p>	<p>Una posible restricción económica del proyecto en un escenario donde la implementación en el Guaviare surja la necesidad de una inversión inicial significativa para la adquisición de equipos, infraestructura y adecuaciones del espacio, lo que puede</p>	<p>En términos de implementación y mantenimiento el costo de un biodigestor puede resultar elevado para comunidades rurales. Sin embargo, existen mecanismos legales que apoyan la adopción del biogás como fuente de energía renovable. La Ley 1715 de 2014 promueve la inversión en tecnologías limpias</p>

	<p>superar la capacidad financiera de la comunidad. De igual forma, los costos asociados al mantenimiento, capacitación del personal y transporte de la materia prima pueden variar y afectar la sostenibilidad económica del sistema. Por último, la dependencia de fuentes externas de inversión puede limitar el avance del proyecto si no se aseguran los recursos de manera oportuna.</p>	<p>mediante incentivos económicos tales como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Deducción del 50% de la inversión en el impuesto de renta (Art 11)</li> <li>Exclusión del IVA para maquinaria y servicios destinados a proyectos de fuentes no convencionales de energía (Art 12)</li> <li>Exención de aranceles para equipos importados (Art 13)</li> <li>Depreciación acelerada de activos del 33.33% anual (Art 14)</li> </ul> <p>Estos beneficios aplican siempre y cuando los proyectos sean certificados por la unidad de planeación minero - energética (UPME).</p>
Restricciones Ambientales	<p>Los impactos ambientales del proyecto se limitan a la generación de residuos de laboratorio, tales como lodos, agua de lavado y material orgánico residual. El volumen de biogás producido es reducido, por lo que no implica un riesgo de contaminación atmosférica significativa en esta escala experimental. No obstante, en una implementación a mayor escala,</p>	<p>Disponer apropiadamente los residuos conforme a protocolos del laboratorio. Para una implementación a gran escala sería necesario implementar planes de gestión ambiental, por ello, es necesario acogerse a la Ley 1715 de 2014 que establece el cumplimiento de los estudios de impacto ambiental, así como de los límites de emisiones y vertimientos definido para este tipo de instalaciones, lo que implica</p>

	un manejo inadecuado de los residuos puede generar afectaciones en los suelos o cuerpos de agua.	contar con los permisos ambientales correspondientes.
Restricciones Salud Y Seguridad	El biogás generado en el proceso contiene metano e impurezas como el sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S), sustancia que pueden representar riesgos por su inflamabilidad y toxicidad si se acumulan en espacios con poca ventilación. Por ello, será necesario implementar sistemas de tratamiento del H <sub>2</sub> S y medidas de seguridad que garanticen una operación segura del biodigestor.	Mantener una adecuada ventilación en el área, usar equipos de protección personal. En la implementación a gran escala se recomienda implementar filtros para la remoción de H <sub>2</sub> S, así como un sistema de ventilación pertinente con el fin de evitar la acumulación de gases peligrosos y capacitación al personal sobre manejo seguro del biodigestor y manejo de emergencias.
Restricciones Sociales Y Culturales	No aplica directamente, pues el estudio no involucra implementación comunitaria inmediata, sin embargo, existe la restricción de que los resultados deben ser comunicados de manera clara para facilitar su comprensión y futura aplicación.	Presentar los resultados en un lenguaje técnico-científico pero accesible, resaltando beneficios potenciales en contextos rurales para así poder vincular el proyecto con la realidad social del Guaviare.
Restricciones Políticas Y Gubernamentales	La continuidad del proyecto puede verse afectada por cambios en las prioridades gubernamentales o falta de incentivos, sin embargo, al ser un proyecto de laboratorio no está	Relacionar los hallazgos con lineamientos de política nacional de transición energética y bioeconomía, como argumento para la relevancia futura del proyecto.

---

condicionado por políticas  
energéticas.

---

*Nota.* La tabla resume las principales restricciones identificadas para el proyecto y las estrategias propuestas para su mitigación, considerando aspectos normativos, técnicos, económicos, ambientales, de seguridad y sociales en la fase experimental y en una posible implementación futura en el Guaviare. Elaboración propia.

## **MARCO DE REFERENCIA**

El acceso a energía confiable, asequible y sostenible es crucial para que el desarrollo de las comunidades rurales de Colombia, particularmente en regiones aisladas como lo es el departamento del Guaviare, donde la infraestructura limitada, la dispersión poblacional y la dependencia de combustibles fósiles ocasionan condiciones de pobreza energética grave. En este contexto, las energías renovables ofrecen una vía viable para mejorar la calidad de vida, promover la productividad rural y mitigar los impactos ambientales adversos.

La biomasa residual agroindustrial, como la proveniente del açaí, representa un recurso subutilizado con alto potencial energético. Esta aproximación, alineada con los principios de la economía circular, no solo fortalece la transición energética y la sostenibilidad ambiental, sino que también potencia la autonomía de la agroindustria.

A continuación, se presenta el marco de referencia que sustenta esta investigación, abordando desde el contexto energético rural en Colombia hasta los fundamentos técnicos de la digestión anaerobia y el uso del digestato para ser aprovechado como biofertilizante.

## **Contexto Energético en Zonas Rurales de Colombia**

Colombia actualmente ha logrado una cobertura energética del 93 %; no obstante, aún existen amplias zonas del territorio nacional sin acceso a este servicio. Se estima que más de 1,37 millones de usuarios carecen de energía eléctrica, especialmente en regiones como el Pacífico y la Amazonía, donde varios municipios tienen una cobertura inferior al 50%. A pesar de la existencia de múltiples fuentes de financiación para lograr cerrar las brechas energéticas de los territorios que cuentan con dificultades de obtener un servicio disponible, continuo y asequible, persisten los obstáculos para identificar proyectos con un nivel mínimo de estructuración que permitan avanzar hacia ese propósito (Departamento Nacional de Planeación, 2025).

### ***Pobreza Energética en Colombia***

La pobreza energética en Colombia puede definirse como la situación en la que los hogares carecen de la capacidad para acceder, utilizar o mantener servicios energéticos mínimos que garanticen el bienestar, la salud y el desarrollo humano. En este sentido, el enfoque multidimensional reconoce que no basta con tener conexión a la electricidad o una fuente de combustible, sino que se debe considerar también la calidad de la energía, la suficiencia de dispositivos, vivienda adecuada, comunicación y territorio preparado para el bienestar (InclusiónSAS & Promigas S.A. E.S.P, 2023).

De acuerdo con el primer reporte del Índice Multidimensional de Pobreza Energética (IMPE, 2022) en Colombia, elaborado por Promigas y su fundación, alrededor del 18,5 % de la población nacional, lo que equivale aproximadamente 9,6 millones de personas, se encontró en condiciones de pobreza energética (IMPE, s. f.). Esta cifra plantea un reto relevante cuando se compara con la cobertura aparente de servicios energéticos: por ejemplo, se reporta que el 97 % de los hogares tienen acceso eléctrico y el 70 % al servicio de gas natural (Zapata, 2023).

Este fenómeno muestra una marcada desigualdad territorial: en las zonas rurales remotas del país, la incidencia de la pobreza energética alcanza el 47,9 %, mientras que en los grandes centros urbanos apenas llega al 4,3 %, es decir, una brecha de aproximadamente 11 veces (Portafolio, 2023). Este resultado evidencia que el solo hecho de tener conexión eléctrica no garantiza una situación de bienestar; más bien, la calidad del servicio, la tecnología disponible para cocinar, el uso de combustibles sólidos y las condiciones de la vivienda también determinan la verdadera accesibilidad energética.

El informe señala que las principales privaciones energéticas asociadas a esta condición incluyen:

- Falta de acceso o calidad adecuada de electricidad (por ejemplo, hogares que residen en municipios con mala calidad del servicio) (Zapata, 2023).
- La dependencia de combustibles sólidos (leña, carbón, residuos) para cocinar en un porcentaje significativo de hogares (por ejemplo, el 47,4 % de los hogares en situación de pobreza energética utilizaban estos combustibles) (Portafolio, 2023)
- La ausencia o insuficiencia de tecnologías eficientes o capaces de traducir la energía en bienestar (por ejemplo, vivienda que no permite liberación de tiempo, dispositivos obsoletos o ausentes, baja conectividad)

Estas privaciones no solo afectan la calidad de vida, por ejemplo, por exposición al humo interior, falta de refrigeración, iluminación deficiente, sino que también profundizan las brechas de pobreza, salud y educación en comunidades rurales y vulnerables. En ese sentido, la pobreza energética se revela como un factor transversal que impacta de forma sinérgica múltiples dimensiones del desarrollo humano. (Portafolio, 2023)

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) ha señalado que abordar la pobreza energética requiere estrategias integradas que promuevan la transición energética justa, el acceso equitativo y el fortalecimiento de capacidades locales para la autogeneración y sostenibilidad de sistemas energéticos. Aunque no se detalla exclusivamente para Colombia en este estudio, el marco es referencial para comprender la necesidad de enfoques integrados (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2023).

En el caso colombiano, el Ministerio de Minas y Energía (MinMinas) ha reconocido esta problemática y se encuentra desarrollando un documento de política (CONPES) para intervenir los territorios con mayor pobreza energética, con inversión estimada en aproximadamente 8 billones de pesos y 50 proyectos prioritarios en regiones como Pacífico, Caribe, Orinoquía y Amazonas (Ministerio de Minas y Energía prepara CONPES para llegar a los territorios con mayor pobreza energética del país, 2025)

### ***Cobertura Eléctrica Rural y Situación en el Guaviare***

En el departamento del Guaviare, la cobertura eléctrica rural presenta retos significativos derivados de su alta ruralidad (superior al 40 %), la dispersión poblacional y las limitaciones de infraestructura. Aunque a nivel nacional la cobertura eléctrica alcanza el 99,7 % en zonas urbanas y el 87,8 % en zonas rurales, en Guaviare persisten brechas notorias, especialmente en las Zonas No Interconectadas (ZNI), donde el suministro depende de grupos electrógenos diésel operados por ENERGUAVIARE, con altos costos y baja confiabilidad. La interconexión al Sistema Interconectado Nacional (SIN) inició en 2002 con la línea Granada–San José del Guaviare, extendiéndose en 2005 hacia los municipios de El Retorno y Calamar, pero aún existen áreas sin conexión estable. El Plan de Energización Rural Sostenible (PERS) Guaviare 2021, elaborado por la UPME, IPSE, ENERGUAVIARE y autoridades locales, plantea

una hoja de ruta a 15 años que prioriza soluciones descentralizadas y sostenibles, con participación comunitaria y aprovechamiento del potencial de energías renovables para superar la dependencia del diésel y mejorar la calidad del servicio en comunidades rurales dispersas (Caracterización de la Oferta Energética Guaviare, 2021).

## **Energías Renovables y Transición Energética**

Actualmente existen muchas razones por las cuales se ha ido incrementando el problema del cambio climático, una de estas razones es la energía, pues su producción se realiza mediante la quema de combustibles fósiles generando gases de efecto invernadero. Con el fin de mitigar los impactos negativos sobre el medio ambiente, surgen las energías renovables (Naciones Unidas, s.f.).

Las energías renovables son un tipo de energías que provienen de fuentes naturales, que llegan a restaurarse más rápido de lo que se consume, por ejemplo, luz solar, viento y agua entre otros. Estas fuentes de energía renovable abundantes pueden encontrarse, y aprovecharse en cualquier entorno a diferencia de los combustibles fósiles. La generación de energías renovables produce menos emisiones de efecto invernadero en comparación con las energías convencionales, este tipo de energías puede ser fundamentales para abordar la crisis del cambio climático (Naciones Unidas, s.f.).

### ***Tipos de Energías Renovables***

Dentro de las alternativas de energías renovables disponibles, existen diferentes fuentes que se caracterizan por su abundancia, sostenibilidad y capacidad de contribuir a la transición energética. En la Tabla 2 se describen algunas de las principales fuentes renovables, resaltando sus principios de funcionamiento y su relevancia para el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles.

**Tabla 2.**

*Tipos de energía renovable*

Tipo de energía	Descripción
Energía Solar	Esta fuente de energía es la más abundante y disponible incluso en condiciones de cielo nublado, se puede aprovechar gracias al efecto fotovoltaico que es un fenómeno que ocurre cuando la radiación lumínica incide sobre materiales semiconductores, generando un flujo de electrones y un voltaje útil para producir electricidad. Las celdas solares que son principalmente de silicio mono o policristalino permiten convertir directamente la luz solar en energía eléctrica ya sea para consumo propio o para inyección a la red. Este tipo de energía es una de las más económicas y sostenibles con una vida útil de 30 años (Díaz, 2024).
Energía Eólica	Este tipo de energía aprovecha el viento mediante aerogeneradores que convierten el movimiento de sus rotores en electricidad a través de un sistema de engranajes y un generador eléctrico. Estas turbinas se pueden instalar en tierra, en alta mar o en aguas dulces, pues en las últimas décadas han evolucionado, aumentando su altura y sus diámetros en el rotor, aumentando así su eficiencia. La generación en entornos acuáticos, en especial en alta mar, permite ampliar la capacidad de que esta fuente sea una oportunidad significativa como energía renovable (Díaz, 2024).

Energía	<p>Transforma la energía cinética o potencial del agua en electricidad mediante turbinas hidráulicas y generadores, se puede aprovechar grandes caudales o saltos de agua, así como pequeños desniveles y corrientes. Esta fuente de energía renovable es la que tiene mayor potencial a nivel mundial, con una eficiencia de conversión cercana al 80%. Su origen está vinculado al ciclo hidrológico impulsado por la energía solar, sin emisiones directas, aunque algunas infraestructuras hidroeléctricas pueden generar impactos ambientales y alterar ecosistemas, por lo que las instalaciones de pequeñas centrales hidroeléctricas se consideran más sostenibles y adecuadas para las comunidades (Díaz, 2024).</p>
Hidroeléctrica	
Bioenergía	<p>La biomasa, es materia orgánica de origen vegetal que puede ser usada para fines energéticos en diferentes formas, sólida, líquida o gaseosa. Antes de la revolución industrial fue la fuente principal de energía para generar calor e iluminación, actualmente se usa en diferentes presentaciones como pellets, briquetas, biogás, biodiesel y bioetanol. La bioenergía surge gracias a la biomasa que es resultado de madera, residuos orgánicos, forestales y flujos de desechos orgánicos, el cual tiene un uso principal en zonas rurales para calefacción, cocción y generación eléctrica. Sin embargo, emite menos gases de efecto invernadero que los combustibles fósiles, la producción a gran escala puede generar impactos ambientales como deforestación y cambios en el uso del suelo, por lo que su implementación requiere criterios de sostenibilidad (Díaz, 2024).</p>

*Nota.* La tabla presenta una descripción general de las principales fuentes de energía renovable, destacando sus principios de funcionamiento, aplicaciones y características relevantes en términos de sostenibilidad y aprovechamiento energético. Elaboración propia.

## ***Bioenergía como Alternativa para Zonas Rurales***

Hacer uso de bioenergía puede representar una opción estratégica para el desarrollo sostenible de las zonas rurales, debido a que aprovecha la biomasa disponible localmente y genera beneficios sociales, económicos y ambientales. En el ámbito social y económico, la producción y el uso impulsan la generación de empleo en actividades de recolección, procesamiento y transformación de la biomasa, específicamente en comunidades donde este recurso es abundante. Se estimó que en 2021 la bioenergía generó alrededor de 2,5 millones de empleos, en gran parte en áreas rurales de países en desarrollo, de igual forma fomentó la inversión en infraestructura y dinamizó la economía local, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética en territorios apartados, lo que contribuye a la disminución de la migración rural hacia las ciudades ya que fortalece las oportunidades de trabajo y emprendimiento en el lugar de origen (Reyes Plascencia et al., 2024).

En términos ambientales, la bioenergía facilita la gestión sostenible de residuos biomásicos, evitando así las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de su descomposición y reduciendo la contaminación del suelo y del agua. Por otra parte, la reincorporación de la biomasa residual a la cadena productiva abre nuevas líneas de negocio para los productores, promoviendo de esta manera, una economía circular, en donde también se contribuye hacia una economía verde que se destaca por ser baja en carbono, eficiente en el uso de recursos y socialmente inclusiva (Reyes Plascencia et al., 2024).

Por último, un aspecto positivo de la bioenergía es su capacidad para integrarse con otras fuentes renovables, ofreciendo un suministro estable y continuo que complementa la intermitencia de tecnologías como la solar y la eólica (Reyes Plascencia et al., 2024).

## **Características del Fruto de Açaí**

El açaí es un tipo de baya que es oriunda de la selva amazónica, que es cultivada en diferentes regiones tropicales como el norte de Brasil y en Colombia en regiones como el Pacífico y la Amazonía, cuya producción ha aumentado de manera significativa debido a su alto valor comercial en las industrias alimentarias, cosmética y nutracéutica. Este fruto es de un tamaño pequeño de forma esférica y de color morado oscuro con un sabor que lo hace muy característico, compuesto por una capa externa de pulpa que recubre una semilla. Su recolección y procesamiento generan importantes volúmenes de residuos agroindustriales, principalmente pulpa sobrante y semillas, los cuales contiene una fuente de potencial de biomasa y compuestos bioactivos de interés industrial (Buratto et al., 2021).

### ***Biomasa Residual de Açaí como Recurso Energético***

La biomasa residual del açaí, compuesta principalmente por semillas y cáscaras, representa una fuente abundante de residuos agroindustriales con alto potencial energético. Su aprovechamiento mediante procesos biológicos o termoquímicas permiten generar alternativas sostenibles de energía, reduciendo impactos ambientales y aportando beneficio a las comunidades productoras en regiones amazónicas (Amaral et al., 2023).

Algunos estudios han evaluado el aprovechamiento de la semilla del açaí como materia prima para la producción de biocombustibles en donde se destaca su afinidad en procesos de conversión térmica. Un análisis realizado sobre esta biomasa determinó un bajo contenido de humedad (9,30%), lo que favorece su combustión y reduce el gasto energético en etapa de secado. Presenta un bajo contenido de cenizas (1,75%), que minimiza la formación de residuos sólidos durante el proceso y también un alto contenido de material volátil (83,5%), un indicador clave de su potencial para generar gases combustibles y bioaceites (Silva et al., 2023).

Por otra parte, mediante termogravimetría, técnica de análisis térmico que mide la variación de la masa de una muestra en función de la temperatura (Silva et al., 2023), evaluó la estabilidad térmica de la semilla obteniéndose información relevante sobre su descomposición y la liberación de compuestos volátiles, aspectos fundamentales para optimizar su conversión en biogás y bioóleo. Estos resultados afirman que los residuos lignocelulósicos del açai presenta propiedades favorables para su uso como materia prima en la producción de energía verde, posicionándolos como un recurso estratégico en el desarrollo de biocombustibles y en la diversificación de la matriz energética de zonas rurales (Silva et al., 2023).

### ***Composición Fisicoquímica de las Semillas y la Fibras de Açai***

En el procesamiento del açai surgen varios residuos, lo cuales incluyen fracciones de pulpa y semillas con características fisicoquímicas diferenciadas. La pulpa contiene un elevado contenido lipídico, con hasta un 43,1% del peso seco con predominio de ácidos grasos insaturados como el ácido oleico con 58,5%, linoleico 22,3% y en cantidades menores puede contener un 11,4% de ácido palmítico y esteárico un 4,1%. También las semillas y la pulpa demuestran tener un alto potencial antioxidante ya que tiene una capacidad de absorción de radicales de oxígeno de 89,760  $\mu\text{mol TE}/100 \text{ gDm}$  para la pulpa y para las semillas un 65,263  $\mu\text{mol TE}/100 \text{ gDm}$  (Buratto et al., 2021).

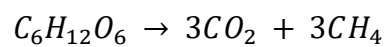
Las semillas, las cuales constituyen la mayor fracción residual, están compuestas en su mayoría por fibras lignocelulósicas y contienen extractivos, azúcares, proteínas y cenizas en proporciones variables, lo que las hace aprovechables como materia prima para poder transformarse en un biocombustible y productos de valor agregado (Buratto et al., 2021).

## **Digestión Anaerobia y Producción de Biogás**

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico en ausencia de oxígeno por medio del cual microorganismos descomponen materia orgánica y la convierten en biogás y digestato, en estructuras controladas como digestores. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency, 2025), este proceso transforma los residuos orgánicos en energía renovable y en un digestato rico en nutrientes que puede emplearse como fertilizante agrícola. La DA se considera una tecnología clave dentro del modelo de economía circular, especialmente en territorios rurales con alta disponibilidad de residuos agrícolas, como los provenientes del açaí, permitiendo aprovechar los desechos locales para la generación de energía y abono orgánico.

### ***Principios del Proceso de Digestión Anaerobia***

La digestión anaerobia (DA) es un proceso enzimático realizado por consorcios microbianos en condiciones sin oxígeno, mediante el cual la materia orgánica se transforma en biogás y digestato. La reacción global puede representarse simbólicamente como:



Este proceso comprende cuatro fases secuenciales principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, las cuales están estrechamente relacionadas entre sí y cada una con funciones específicas:

- **Hidrólisis:** En esta primera etapa, los polímeros orgánicos complejos como carbohidratos, proteínas y lípidos se descomponen en moléculas más simples (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos) por acción de enzimas extracelulares producidas por bacterias hidrolíticas.

Esta fase es esencial, ya que determina la disponibilidad de sustratos para las siguientes etapas del proceso (Alengebawy et al., 2024).

- **Acidogénesis:** Los productos simples resultantes de la hidrólisis son fermentados por bacterias acidogénicas, generando ácidos grasos volátiles (AGV), alcoholes, hidrógeno ( $H_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Esta fase también provoca una disminución del pH, creando las condiciones óptimas para el desarrollo de las bacterias acetogénicas (Alengebawy et al., 2024).
- **Acetogénesis:** Durante esta fase, los ácidos grasos volátiles y alcoholes formados anteriormente son oxidados por bacterias acetogénicas, generando acetato,  $CO_2$  y  $H_2$ . Estos compuestos son los sustratos directos que utilizarán las arqueas metanogénicas en la siguiente etapa (Alengebawy et al., 2024).
- **Metanogénesis:** Finalmente, las arqueas metanogénicas convierten el acetato, el  $CO_2$  y el  $H_2$  en metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ), produciendo el biogás. Esta etapa es fundamental, ya que define la eficiencia energética y la formación de biogás del proceso, ya que depende directamente de la actividad de microorganismos del dominio Archaea (Alengebawy et al., 2024).

En conjunto, la digestión anaerobia representa un sistema biotecnológico complejo, pero altamente eficiente para la valorización de residuos orgánicos y la producción sostenible de energía renovable.

### ***Factores que Influyen en la Digestión Anaerobia***

Según Shah et al. (2024) algunos parámetros críticos que afectan el rendimiento óptimo del proceso incluyen:

- **Temperatura:** Los rangos operativos más comunes son mesófilo (~35 °C) y termófilo (~55 °C). El régimen termófilo ofrece mayor producción y concentración de metano, pero exige mayor aporte energético para calentamiento y control.
- **pH:** El intervalo óptimo se sitúa entre 6,8 y 7,2 y desviaciones fuera del rango 6,3 - 7,8 pueden inhibir significativamente la metanogénesis.
- **Tiempo de Retención Hidráulica (HRT):** Depende del tipo de digestor; por ejemplo, en sistemas UASB el HRT puede ser de horas, mientras que en digestores convencionales puede extenderse a semanas.
- **Relación Carbono / Nitrógeno (C/N):** Idealmente entre 8 y 20, para evitar acumulación de amoníaco o limitaciones de nitrógeno.
- **Carga Orgánica (OLR) y Mezclado:** Altas cargas pueden causar acidificación; el mezclado homogeniza el contenido y mejora el rendimiento.

### ***Composición del Biogás y Contextos Rurales***

El biogás, producto de la digestión anaerobia, presenta una composición típica compuesta principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) en proporciones que oscilan entre el 50 % y 75 %, acompañado de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en un rango de 25 % a 50 %, así como trazas de otros componentes como nitrógeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, humedad y amoníaco, según la naturaleza del sustrato y las condiciones operativas del digestor. Este perfil confiere al biogás un poder calorífico variable, estimado entre 16 y 28 MJ/m<sup>3</sup>, lo que lo convierte en una fuente energética útil tanto para calor como para generación eléctrica (Angelidaki et al., 2018). En contextos rurales, este recurso tiene múltiples aplicaciones prácticas: puede ser empleado directamente para cocinar o calentar viviendas, lo que reduce la dependencia de leña y mejora la salud respiratoria; también puede utilizarse en motores o microturbinas para generación eléctrica

descentralizada, y para procesos agroindustriales que requieran calor, como el secado o la pasteurización (Biogás Mejora La Calidad de Vida En Zonas Rurales de Colombia, 2024).

## **Digestato**

El digestato es el subproducto generado en el proceso de digestión anaerobia de residuos orgánicos. Se compone de dos fracciones: una líquida, rica en nutrientes fácilmente disponibles como nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), fósforo soluble y potasio; y una fracción sólida con alto contenido de materia orgánica estable, fósforo orgánico y micronutrientes. A diferencia de los fertilizantes minerales, el digestato aporta simultáneamente nutrientes de liberación rápida y compuestos orgánicos que mejoran la estructura y fertilidad del suelo. Esto le confiere un valor dual: como fertilizante inmediato para cultivos y como enmienda orgánica que favorece la capacidad de retención de agua y la actividad microbiana del suelo (Lukehurst & Frost, s. f.).

El digestato obtenido tras la digestión anaerobia presenta un perfil nutricional altamente beneficioso para la agricultura, ya que retiene la mayor parte de los nutrientes presentes en la biomasa original, pero en formas más asimilables para las plantas. El nitrógeno (N) contenido en el digestato está disponible en una fracción considerable como amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), lo que lo hace de rápida absorción para los cultivos, a diferencia del estiércol crudo, donde predomina el nitrógeno orgánico que requiere mineralización previa (44%–81 % del nitrógeno total en forma amoniacal). En promedio, el digestato líquido contiene entre 50% –70 % del nitrógeno total en forma amoniacal, lo que favorece un aporte inmediato a la planta y contribuye a reducir la necesidad de fertilizantes nitrogenados de síntesis (Sharifi et al., 2019).

El fósforo (P) presente en el digestato proviene principalmente de compuestos orgánicos y minerales contenidos en la biomasa, aunque su fracción soluble es menor que la del nitrógeno,

aporta un suministro gradual y sostenido que ayuda al desarrollo radicular y la formación de semillas. Por su parte, el potasio (K) se mantiene prácticamente sin alteraciones durante la digestión, lo que asegura su presencia en niveles relevantes, alcanzando hasta 16 kg de  $K_2O$  por tonelada de digestato en algunos casos (Möller & Müller, 2012). Además, el digestato puede contener micronutrientes esenciales como calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), zinc (Zn) y cobre (Cu), que refuerzan el balance mineral del suelo y mejoran la calidad de los cultivos (Digestate Fertilizer Value, 2025).

Desde el punto de vista agronómico, esta combinación convierte al digestato en un fertilizante multicomponente, con un efecto comparable a los abonos minerales convencionales, pero con la ventaja de que reduce los costos de insumos agrícolas y favorece la economía circular al transformar residuos en un recurso útil. Un estudio que modeló el valor de sustitución de fertilizantes reportó tasas como 5 kg N, 2 kg  $P_2O_5$  y 5 kg  $K_2O$  por tonelada de digestato, aportando también azufre y representando una alternativa rentable frente a fertilizantes comerciales (Tröster, 2023). Su uso no solo mejora la fertilidad inmediata del suelo, sino que también aumenta la materia orgánica estable, lo que repercute en una mejor estructura, mayor retención de agua y mayor actividad microbiana.

### ***Impacto del Digestato en los Suelos***

El uso del digestato en suelos agrícolas genera efectos positivos tanto en su fertilidad como en sus propiedades fisicoquímicas. Diversos estudios han demostrado que la aplicación de digestato mejora la estructura del suelo, aumentando la estabilidad de los agregados y reduciendo la susceptibilidad a la erosión (Cooke et al., 2023). Además, su aporte de materia orgánica y nutrientes de liberación progresiva incrementa la capacidad de retención de agua y la

disponibilidad de nutrientes esenciales para los cultivos (Alburquerque et al., 2012). Asimismo, el digestato estimula la actividad microbiana beneficiosa, favoreciendo procesos de mineralización y aumentando la biodiversidad edáfica (Lamolinara et al., 2022). Estos beneficios lo convierten en una alternativa sostenible frente a los fertilizantes minerales, ya que contribuye al secuestro de carbono en el suelo y, por ende, a la mitigación del cambio climático. No obstante, su aplicación debe ser regulada para evitar la lixiviación de nitratos o la acumulación excesiva de nutrientes que podrían impactar negativamente los ecosistemas cercanos.

### ***Aplicación de Digestato en Cultivos***

La aplicación del digestato en cultivos agrícolas ha mostrado resultados favorables en términos de rendimiento y calidad de la producción, debido a su aporte balanceado de nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes esenciales. Estudios en diferentes sistemas agrícolas evidencian que el digestato puede sustituir parcial o totalmente a los fertilizantes sintéticos, manteniendo niveles de productividad comparables o incluso superiores en cultivos como maíz, trigo y hortalizas (Alburquerque et al., 2012). Además, su liberación progresiva de nutrientes contribuye a reducir pérdidas por lixiviación, mejorando la eficiencia en el uso del nitrógeno. En cultivos tropicales, su aplicación ha demostrado potenciar el crecimiento vegetativo y aumentar la biomasa cosechada, lo cual resulta especialmente relevante en contextos de suelos ácidos y de baja fertilidad como los del Guaviare (Panuccio et al., 2021).

Sin embargo, para maximizar sus beneficios, es necesario ajustar las dosis de aplicación según el tipo de cultivo y la composición del digestato, evitando excesos que puedan provocar salinización o desequilibrios nutricionales.

## **Economía Circular**

La economía circular es un modelo de producción y consumo que promueve iniciativas como compartir, arrendar, reutilizar, reparar, reacondicionar y reciclar los productos y materiales existente las veces que sea posible, con el objetivo de generar un mayor valor. De esta manera, se puede prolongar la vida útil de los bienes (Guillot, 2023).

En términos generales, este tipo de economía busca disminuir la generación de desechos. Cuando un producto llega al fin de su ciclo de uso, sus componentes permanecen en la economía mediante procesos de reciclaje, lo que favorece que se usen de manera continua, aportando un valor renovado (Guillot, 2023).

### ***Biogás y Economía Circular***

La generación de biogás contribuye positivamente a la economía circular ya que transforma los residuos agrícolas e industriales en recursos valiosos, logrando cerrar ciclos de materiales y energía y promoviendo la sostenibilidad (Bigarelli Ferreira et al., s. f.).

Al usar un biodigestor se puede lograr reutilizar los residuos generados en la agroindustria, convirtiéndolos en productos que agregan valor al sistema, gracias a este enfoque la generación de residuos y la contaminación ambiental permite la reducción de estos (Bigarelli Ferreira et al., s. f.).

Asimismo, en la producción de biogás se genera biofertilizantes (digestato), que se pueden aplicar a los cultivos agrícolas, lo que reduce la necesidad de usar fertilizantes convencionales que pueden ser contraproducentes para la salud y al usar el digestato como biofertilizante se puede mejorar la calidad del suelo (Bigarelli Ferreira et al., s. f.).

### ***Beneficios económicos y ambientales del biogás y biofertilizante***

Dentro de los beneficios ambientales que con lleva la producción de biogás se encuentran: la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, pues al sustituir la generación de electricidad a partir de fuentes fósiles por una renovable se puede evitar la liberación de metano de los residuos no tratados hacia a la atmósfera y ser aprovechado para la generación de energía, ya que el metano tiene un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el del dióxido de carbono, haciéndolo óptimo para este proceso (Velásquez-Piñas et al., 2023).

En cuanto a los beneficios ambientales del uso del digestato como biofertilizante se encuentra la reducción de la dependencia de fertilizantes nitrogenados a base de urea, pues ayuda a cerrar ciclos de nutrientes y a mejorar la salud del suelo (Velásquez-Piñas et al., 2023). La gestión y valoración adecuada de los residuos orgánicos mediante la digestión anaerobia contribuye al fortalecimiento de la base de datos sobre tratamiento de residuos y facilita la toma de decisiones medioambientales informadas, ya que diversos estudios han demostrado que este proceso puede reducir el impacto ambiental hasta en un 77 %. (Velásquez-Piñas et al., 2023).

Por último, dentro de los beneficios económicos cabe aclarar que, para considerar viable financieramente un proyecto se tiene en cuenta algunas herramientas económicas como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y por lo general un proyecto se considera viable si su VAN es positivo y su TIR es superior a la tasa atractiva mínima (MAR). Así pues, los biodigestores garantizan seguridad energética y diversifican los ingresos de las agroindustrias ya que estos generaran energía logrando así una reducción de los costos en electricidad, pues en regiones que cuentan con normativas favorables, los sistemas de biogás pueden reducir las facturas de energía al introducir el exceso de electricidad a la red mediante el consumo directo lo

que podría ofrecer ahorros sustanciales en comparación con la compra de electricidad de la red (Velásquez-Piñas et al., 2023).

## **METODOLOGÍA**

### **Enfoque de la Investigación**

El presente proyecto se desarrolló bajo un enfoque mixto, combinando elementos cualitativos y cuantitativos con el fin de obtener una visión integral del problema y su solución. Desde el componente cualitativo, se buscó comprender la dinámica social y ambiental en torno al manejo de los residuos de açai en el Guaviare, identificando percepciones, prácticas actuales de disposición y posibles barreras de adopción tecnológica en la comunidad. Este análisis permitió contextualizar el proyecto en un entorno real y alinearlo con los principios de sostenibilidad y economía circular. Desde el componente cuantitativo, se realizaron mediciones experimentales de la capacidad de generación de biogás a partir de residuos de açai (semillas y fibras) y dos diferentes inóculos (lodos de PTAR y estiércol bovino), analizando el volumen de gas, sólidos totales y sólidos volátiles.

Este enfoque mixto posibilita no solo validar el biodigestor en términos técnicos, sino también entender su aplicabilidad práctica en las comunidades rurales, integrando dos dimensiones complementarias: la científica y la social.

### **Alcance de la Investigación**

El alcance de la investigación es correlacional, dado que el objetivo principal es identificar y analizar la relación entre el tipo de residuo de açai empleado, el inóculo utilizado y la producción de biogás en condiciones controladas de biodigestión anaerobia, explorando cómo

las características fisicoquímicas de los residuos (humedad, contenido de lignina, composición en carbohidratos) influyen en parámetros clave de la digestión (producción de gas, estabilidad del proceso). De igual manera, se establecieron correlaciones entre el tiempo de retención y la eficiencia de conversión energética, lo que permitirá identificar patrones que optimicen el proceso.

Este alcance no busca establecer causalidad definitiva, sino comprender las interacciones y relaciones entre variables relevantes que fundamentan la viabilidad técnica del proyecto y su futura escalabilidad.

### **Diseño de la Investigación**

El proyecto se enmarca en un diseño experimental, pues se manipularon de manera controlada las variables independientes para observar su efecto sobre las variables dependientes.

- Las variables independientes serán: tipo de residuo de açai (semilla, fibra, mezcla), tipo de inóculo empleado, relación inóculo-residuo y tiempo de retención.
- Las variables dependientes corresponderán a: volumen de biogás producido.

Se empleó un diseño de laboratorio con réplicas para garantizar validez estadística, donde se establecieron reactores experimentales con residuos e inóculo en diferentes proporciones. El registro sistemático de datos permitió comparar el comportamiento de cada tratamiento y evaluar cuál condición maximiza la generación de biogás.

El carácter experimental de este diseño respalda la posibilidad de reproducibilidad, control de condiciones y validación objetiva de hipótesis, garantizando resultados confiables y aplicables en fases posteriores del proyecto.

### **Etapas de Investigación**

Las etapas de la investigación se estructuraron de acuerdo con los objetivos específicos planteados en el proyecto. A continuación, se presenta la Tabla 3 que resume este esquema metodológico desarrollado.

**Tabla 3.**

*Etapas de Investigación*

Etapa	Método	Herramienta de Recolección de Información
Determinación las propiedades fisicoquímicas y el potencial energético de la biomasa residual de açái.	Análisis de laboratorio para la caracterización básica del residuo: determinación de humedad, cenizas, sólidos totales y sólidos volátiles, siguiendo métodos gravimétricos, secando una muestra pesada a 105°C hasta obtener un peso constante.	Equipos de laboratorio (estufa, mufla, molino), hojas de registro de datos experimentales.
Establecimiento del potencial de producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de los residuos de açái.	Ensayos de digestión anaerobia a escala laboratorio mediante pruebas de Potencial Bioquímico de Metano (PBM). Los ensayos se llevaron a cabo en biodigestores tipo botella, operados bajo condiciones controladas como temperatura y	Sistemas volumétricos de medición de gas con solución alcalina (NaOH), probetas graduadas, botellas de reacción, mangueras y válvulas de conexión.

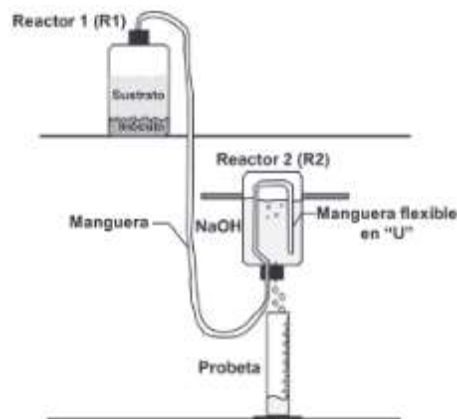
tiempo de retención. La medición se realizó mediante sistemas de desplazamiento de volumen. El sistema estará conformado por un reactor de digestión anaerobia (R1), que contiene la mezcla del sustrato e inóculo y un segundo reactor (R2) con una solución alcalina de hidróxido de sodio (NaOH) para la captura del CO<sub>2</sub>. El biogás generado en R1 es conducido por conexión de mangueras hacia R2, donde el CO<sub>2</sub> reacciona con la solución garantizando que el volumen de gas medido corresponde principalmente a CH<sub>4</sub>. El metano producido se cuantifica mediante el desplazamiento de líquido en una probeta graduada garantizando una medición sencilla y confiable a escala laboratorio (Cárdenas Cleves et al., 2016)

Observación directa y registro experimental .

**Figura 2.**

*Configuración experimental del sistema PBM adoptado para la medición de metano.*

---



*Nota.* Modelo del sistema para determinación PBM recuperado de (Cárdenas Cleves et al., 2016).

Evaluación de la viabilidad técnica y económica del sistema de generación de biogás.	Análisis técnico del proceso (rendimiento, estabilidad, condiciones óptimas) y evaluación económica preliminar a escala laboratorio. Estimación de indicadores financieros como la Tasa Interna de Retorno (TIR), periodo de recuperación y relación beneficio-costos, con proyección preliminar a comunidades rurales.	Revisión documental de costos de referencia, bases de datos de precios de equipos y materiales, análisis comparativo de resultados experimentales y hojas de cálculo (Excel) para análisis financiero.
--	---	--

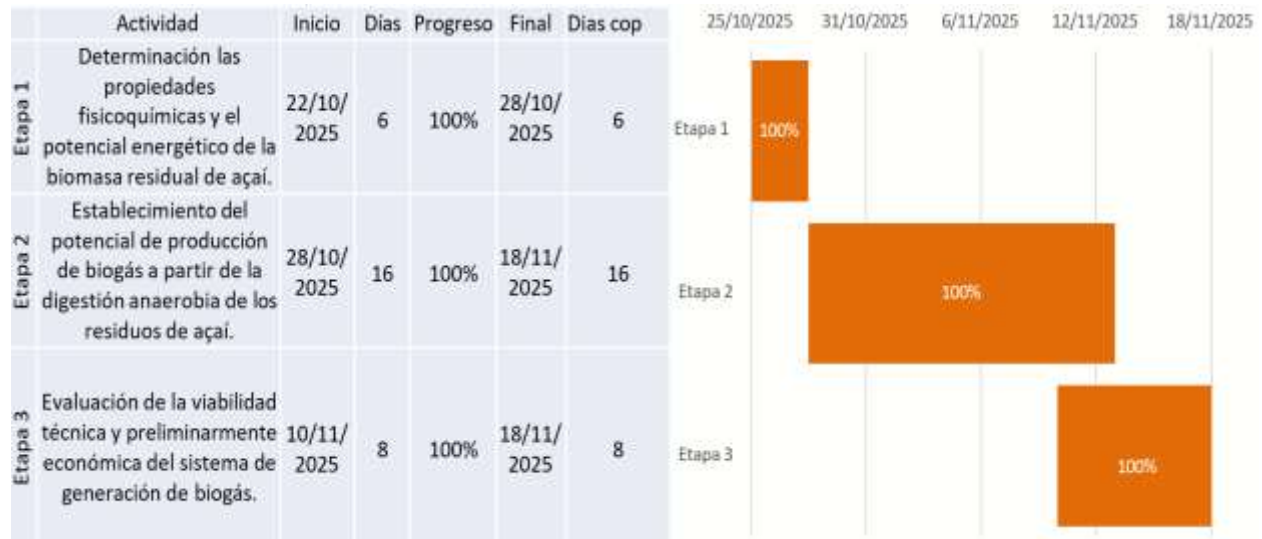
*Nota.* La tabla resume las etapas metodológicas del proyecto, los métodos aplicados en cada fase y las herramientas empleadas para la recolección y análisis de la información, desde la caracterización fisicoquímica de la biomasa hasta la evaluación de la viabilidad técnica y económica del sistema de generación de biogás.

Para el desarrollo del proyecto se estructuró un plan metodológico dividido en tres etapas, cada una con actividades específicas, tiempos definidos y seguimiento de su progreso. La

planificación se organizó mediante un cronograma tipo diagrama de Gantt, lo que permitió visualizar de manera clara la secuencia y duración de las tareas, así como su nivel de avance.

**Figura 3.**

*Cronograma de actividades del proyecto para la evaluación del potencial de producción de biogás a partir del residuo de açai.*



*Nota.* Elaboración propia.

La primera etapa correspondió a la determinación de las propiedades fisicoquímicas y el potencial energético de la biomasa residual de açai, desarrollada en seis días. La segunda etapa, con una duración de dieciséis días, se enfocó en establecer el potencial de producción de biogás mediante digestión anaerobia. Finalmente, la tercera etapa contempló la evaluación de la viabilidad técnica y preliminarmente económica del sistema de generación de biogás, completada en ocho días. Este enfoque permitió una ejecución ordenada, eficiente y con un control preciso del progreso de cada fase del proyecto.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Caracterización de propiedades fisicoquímicas de biomasa residual

La primera etapa de la investigación se centró en la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de la biomasa residual empleada como sustrato en el proceso de digestión anaerobia, con el fin de evaluar su potencial energético y su comportamiento esperado durante la biodegradación. Se analizaron los residuos de açai (*Euterpe precatoria*) y, como sustrato comparativo, los residuos del palmito.

El residuo de açai, como se observa en la Figura 4, se caracteriza por un alto contenido de lignina y fibra cruda, así como por su baja humedad y densidad aparente. Factores que puede dificultar la biodegradación y limitar su potencial de producción de biogás sin un adecuado pretratamiento.

De acuerdo con el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI, el açai es una palma amazónica de la familia *Arecaceae*, que alcanza entre 10 y 20 metros de altura y produce racimos de 573 a 3.677, con un peso promedio de 1.44 a 1.7 gramos por fruto. Estos frutos presentan un alto contenido de aceites y compuestos fenólicos, además de una estructura lignocelulósica predominante, lo que explica la baja fracción de sólidos volátiles observada en los análisis fisicoquímicos y su limitada biodegradabilidad en condiciones anaerobias (Castro et al., 2015).

#### **Figura 4.**

##### *Residuos de Fibra y Semilla de Açai*



*Nota.* Derivados agroindustriales compuestos por fibra y semilla de açai. Fotografía tomada por Agudelo, Erika (2025)

#### **Caracterización del residuo de palmito como sustrato comparativo**

#### **Figura 5.**

##### *Residuos de Fibra de Palmito*



*Nota.* Derivados agroindustriales compuestos por fibra de palmito. Fotografía tomada por Agudelo, Erika (2025)

En cuanto a las características del palmito en la Figura 5 se puede observar el residuo de palmito el cual presenta una composición más rica en materia orgánica fácilmente degradable, con mayor contenido de carbohidratos y humedad, y menor proporción de compuestos

lignocelulósicos, lo que lo hace potencialmente más susceptible a la acción microbiana (Moraes et al., 2022). Además, según el estudio “Productos forestales, medios de subsistencia y conservación” para el cultivo de palmito, esta biomasa residual se caracteriza por una fracción importante de almidones y azúcares solubles al inicio del proceso de degradación, lo que favorece la fase hidrolítica del digestor (Shanley, 2004).

Este mayor contenido de carbohidratos solubles y humedad facilita la actividad del consorcio microbiano anaerobio al acortar la etapa de hidrólisis y acelerar la conversión hacia ácido acético e hidrógeno, precursores de la metanogénesis. La menor lignificación de las fibras del tallo joven del palmito significa que la matriz estructural es más accesible, reduciendo la necesidad de un pretratamiento intenso comparado con sustratos altamente lignocelulósicos. Esta característica sugiere que el residuo de palmito puede ofrecer tiempos de retención más cortos, mayor tasa de degradación de sólidos volátiles y un rendimiento de biogás más eficiente bajo condiciones operativas similares.

Por tanto, su utilización como sustrato favorece la estabilidad del sistema de digestión anaerobia, minimiza riesgos de acumulación de material refractario y permite que el proceso se enfoque más en la etapa de metanogénesis. Esta composición favorece la hidrólisis de los polisacáridos y la liberación rápida de azúcares fermentables, incrementando la eficiencia del proceso metanogénico y la producción de biogás en comparación con el bagazo del fruto. Estas diferencias justificaron su inclusión como material comparativo, permitiendo evaluar cómo la composición del sustrato influye en la generación de biogás y la estabilidad del sistema (Shanley, 2004).

## Resultados de la caracterización fisicoquímica

En relación con el objetivo planteado de determinar las propiedades fisicoquímicas de la biomasa residual empleada en el proceso de digestión anaerobia, se realizó el análisis del contenido de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) de los sustratos seleccionados: açai y palmito. Estos parámetros son indicadores clave de la composición orgánica y del potencial energético del material, ya que los sólidos totales reflejan la cantidad de materia seca presente, mientras que los sólidos volátiles representan la fracción biodegradable susceptible de ser transformada por el microbiota anaerobio en el biogás (Lipps WC et al., 2000).

### Tabla 4.

*Resultados de solidos volátiles (SV) y solidos totales (ST)*

<b>Sustrato</b>	<b>% SV</b>	<b>% ST</b>
Açai	1,0086	17,6372
Açai	1,1586	10,2815
Açai	1,0135	
<b>Promedio</b>	<b>1,0602</b>	<b>13,9593</b>
Palmito	9,3388	58,0263
Palmito	8,9775	60,3921
Palmito	9,2856	
<b>Promedio</b>	<b>9,2006</b>	<b>59,2092</b>

*Nota.* Relación sustrato - inóculo empleado en los ensayos de biodigestión anaerobia con residuos de açai y palmito, utilizando estiércol de cerdo y lodos PTAR como inóculos. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4 Resultados de solidos volátiles (SV) y solidos totales (ST), donde se observa una diferencia significativa entre los valores de ambos sustratos. El residuo de açai presentó un promedio de 13,96 % de ST y 1,06 % de SV, lo que indica un alto contenido de sólidos no volátiles o materiales inorgánicos y lignocelulósicos. Esta composición sugiere una baja fracción biodegradable, atribuida a la presencia de lignina, fibras y

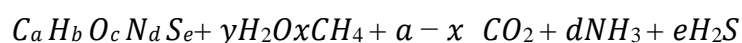
componentes estructurales que limitan la acción microbiana y reducen la tasa de producción de biogás (da Silva et al., 2021). De acuerdo con León Velásquez (2024) para identificar la eficiencia del proceso es recomendable que los ST sean superiores al 70% de lo contrario se puede identificar que este tipo de residuo no puede ser viable para su combustión.

Por otra parte, el residuo de palmito mostró un promedio de 59,21 % de ST y 9,20 % de SV, evidenciando una mayor proporción de materia orgánica fácilmente degradable. Este comportamiento es característico de residuos vegetales con alto contenido de humedad y compuestos fermentables, lo que los hace más adecuados para procesos de digestión anaerobia y con mayor potencial energético respecto al açaí (Moraes et al., 2022).

En conjunto, estos resultados confirman que el palmito presenta mejores condiciones fisicoquímicas para la producción de biogás en comparación con el residuo de açaí, el cual sugiere que requiere algún tipo de pretratamiento físico o químico para mejorar su biodegradabilidad.

### **Potencial Máximo teórico de producción de biogás**

El potencial máximo teórico de producción de metano se estimó utilizando la ecuación de Buswell, la cual se fundamenta en la composición elemental de los residuos orgánicos y supone una conversión estequiométrica completa de la materia orgánica en metano y dióxido de carbono. Esta ecuación describe una reacción redox equilibrada cuyos productos incluyen metano, dióxido de carbono, amoníaco y, en algunos casos, sulfuro de hidrógeno. Para calcular la conversión estequiométrica total de cada residuo en estos compuestos, se aplicaron las siguientes ecuaciones:



$$x = 0,125 (4a + b - 2c - 3d + 2e)$$

Como resultado se obtiene

CH <sub>4</sub> ml/g SVTeórico	CH <sub>4</sub> ml/g SVExperimental
15,33	258

De acuerdo con esta comparación de resultados se puede concluir que el incremento en el volumen experimental se debe en gran medida al estiércol de cerdo esto debido a sus altos contenidos en materia orgánica, compuesta principalmente por carbohidratos, proteínas y grasas, que los microorganismos descomponen y utilizan para producir energía y biogás (Nagarajan, D. et al., 2019). Por lo tanto, la mayor producción observada en el laboratorio refleja principalmente el aporte del estiércol y no una mayor biodegradabilidad del residuo, por lo que se puede identificar que el sustrato no es lo suficientemente eficiente como generador de biogás.

### **Establecimiento de la relación sustrato-inóculo y evaluación de potencial de producción de biogás**

Previo al inicio del proceso de digestión anaerobia, fue necesario establecer las proporciones adecuadas entre el sustrato orgánico y el inóculo biológico, con el fin de garantizar un equilibrio entre la disponibilidad de materia biodegradable y la actividad microbiana responsable de la producción de biogás. La relación sustrato-inóculo (S/I) constituye un parámetro determinante en la eficiencia del proceso, ya que influye directamente en la tasa de degradación de la materia orgánica, la estabilidad del sistema y la generación de metano.

En este estudio se emplearon residuos agroindustriales de açaí como sustrato principal, y de palmito como sustrato comparativo, con el propósito de evaluar diferencias en su comportamiento durante la digestión anaerobia a partir de sus propiedades fisicoquímicas.

En la Tabla 5 Relación Sustrato – Inóculo se presentan las diferentes combinaciones evaluadas entre los sustratos y los inóculos utilizados durante la etapa experimental. Se emplearon residuos agroindustriales de açai y palmito como sustratos principales, los cuales fueron mezclados con dos tipos de inóculos: estiércol de cerdo y lodos provenientes de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

**Tabla 5.**

*Relación Sustrato – Inóculo*

Botella	Relación	Sustrato (g)	Inóculo (g)
1	1:1	Açai	Estiércol cerdo
2	1:1	Açai	Estiércol cerdo
3	1:2	Açai	Estiércol cerdo
4	1:2	Açai	Estiércol cerdo
5	1:1	Palmito	Estiércol cerdo
6	1:1	Palmito	Estiércol cerdo
7	1:2	Palmito	Estiércol cerdo
8	1:2	Palmito	Estiércol cerdo
9	1:1	Açai	Lodos PTAR Calera
10	1:1	Açai	Lodos PTAR Calera
11	1:2	Açai	Lodos PTAR Calera
12	1:2	Açai	Lodos PTAR Calera

*Nota.* Relación sustrato - inóculo empleado en los ensayos de biodigestión anaerobia con residuos de açai y palmito, utilizando estiércol de cerdo y lodos PTAR como inóculos. Elaboración propia.

Para cada combinación se establecieron dos relaciones sustrato - inóculo (S/I): 1:1 y 1:2, con el fin de analizar la influencia de la proporción del inóculo en el proceso de biodigestión. En la relación 1:1, las masas de sustrato e inóculo fueron equivalentes, mientras que en la 1:2 se duplicó la cantidad de inóculo respecto al sustrato, buscando favorecer la estabilidad microbiológica y reducir posibles inhibiciones durante la fermentación anaerobia.

En total se dispusieron 12 botellas experimentales (reactores de laboratorio), agrupadas según el tipo de sustrato y el tipo de inóculo, tal como se detalla a continuación y como se resume en la Tabla 5 Relación Sustrato – Inóculo:

- **Botellas 1 a 4:** Mezcla de açai con estiércol de cerdo, variando las relaciones 1:1 y 1:2, con su respectivo duplicado.
- **Botellas 5 a 8:** Mezcla de palmito con estiércol de cerdo, bajo las mismas proporciones, con su respectivo duplicado.
- **Botellas 9 a 12:** Mezcla de açai con lodos PTAR, también en relaciones 1:1 y 1:2, con su respectivo duplicado.

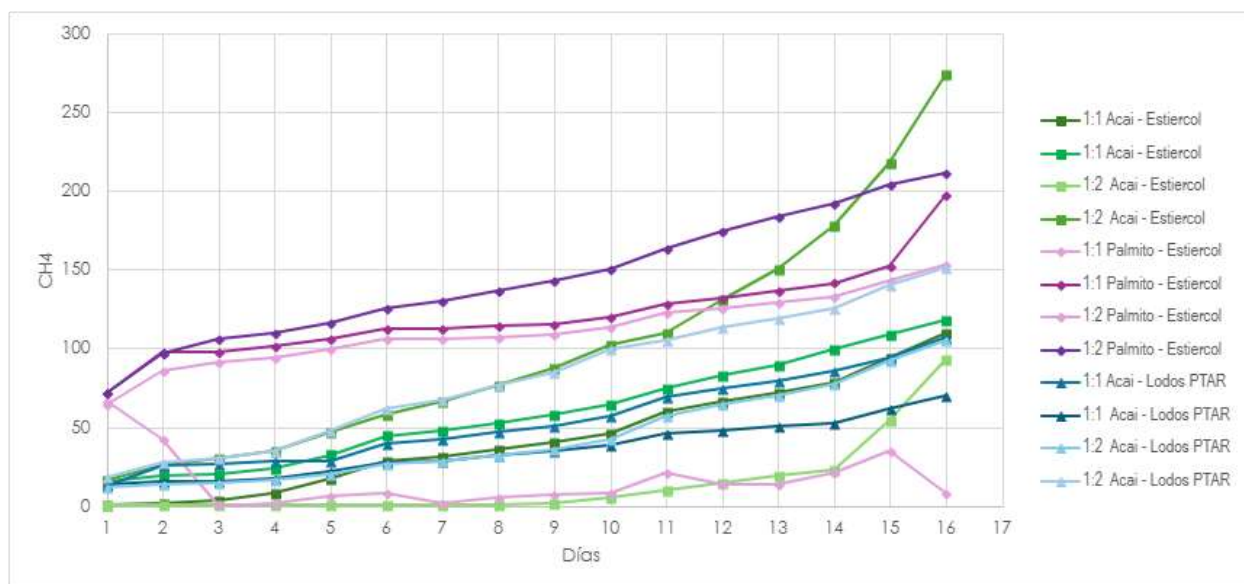
Este diseño permitió comparar el efecto del tipo de sustrato y del tipo de inóculo sobre la producción potencial de biogás y la estabilidad del sistema, sentando las bases para determinar las condiciones más adecuadas en futuros ensayos de digestión anaerobia a mayor escala.

### **Evaluación del potencial de producción de biogás**

En cuanto a la fase experimental, se evidenció una producción de metano diferencial entre los sustratos evaluados, como se evidencia en la Figura 6, siendo el palmito el material que generó mayores volúmenes acumulados de CH<sub>4</sub> a lo largo del periodo de retención en el tiempo de experimentación. En los reactores que contenían palmito (botellas 5 a 8), se observó una tendencia ascendente más pronunciada, alcanzando valores aproximados de entre 150 y 220 ml de CH<sub>4</sub>. En contraste, los reactores que contenían açai (botellas 1 a 4 y 9 a 12) mostraron una producción menor, con valores finales cercanos a 50–70 ml de CH<sub>4</sub>, lo que sugiere una menor biodegradabilidad del sustrato.

**Figura 6.**

*Producción acumulada de metano (CH<sub>4</sub>) durante el tiempo de experimentación de digestión anaerobia.*



*Nota.* Relación sustrato - inóculo empleado en los ensayos de biodigestión anaerobia con residuos de açaí y palmito, utilizando estiércol de cerdo y lodos PTAR como inóculos. Elaboración propia.

Esta diferencia puede explicarse a partir de la composición fisicoquímica de los materiales orgánicos. De acuerdo con los resultados de la caracterización, el palmito presentó un contenido promedio de sólidos volátiles (SV) del 9,20% y de sólidos totales (ST) del 59,20%, indicando una mayor fracción de materia orgánica susceptible de degradación biológica. Por su parte, el açaí mostró valores significativamente menores (SV = 1,06%; ST = 13,96 %), lo cual refleja una baja proporción de compuestos fácilmente biodegradables y una alta presencia de lignina, celulosa y hemicelulosa, que dificultan la acción microbiana durante las etapas hidrolítica y acidogénica de la digestión anaerobia (Teixeira & Mendes, 2023).

Asimismo, el tipo de inóculo empleado tuvo una influencia directa sobre la producción de metano. Los sistemas inoculados con estiércol de cerdo (botellas 1–8) evidenciaron una generación más elevada y estable de  $\text{CH}_4$  respecto a los inoculados con lodos de la PTAR (botellas 9–12). Este comportamiento se debe a que el estiércol porcino posee una comunidad microbiana metanogénica más activa, así como una mayor concentración de nutrientes esenciales (nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes) que favorecen el equilibrio metabólico de los microorganismos involucrados en la digestión anaerobia (Valentin et al., 2024). En cambio, los lodos provenientes de la PTAR suelen presentar una menor densidad microbiana y la posible presencia de compuestos inhibitorios (como metales pesados o agentes químicos del tratamiento de aguas residuales), lo que puede afectar negativamente la producción de biogás.

En cuanto a la relación sustrato/inóculo (S/I), se identificó que los sistemas con una relación de 1:1 tendieron a alcanzar una producción acumulada de metano ligeramente superior a los de 1:2. Esto sugiere que, aunque una mayor cantidad de inóculo puede favorecer la estabilidad microbiológica, el exceso puede diluir la carga orgánica y, por tanto, disminuir el rendimiento volumétrico del biogás (Khadka et al., 2022). En este caso, las proporciones 1:1 favorecieron una sincronización adecuada entre la disponibilidad de materia orgánica y la capacidad de degradación microbiana, permitiendo una conversión más eficiente del sustrato a  $\text{CH}_4$ .

En conjunto, los resultados demuestran que el palmito presenta un mayor potencial energético y un comportamiento más estable durante la digestión anaerobia que el residuo de açaí. Este último, pese a mostrar una baja producción inicial de metano, podría ser valorizado energéticamente mediante pretratamientos físico - químicos o enzimáticos que rompan su estructura lignocelulósica y aumenten la accesibilidad del carbono fermentable. Así, se establece

que el uso de palmito con estiércol de cerdo bajo una relación S/I de 1:1 representa la condición más eficiente entre las evaluadas, sentando las bases para futuros estudios de escalado y optimización del proceso.

### **Caracterización del proceso productivo del açáí desde la perspectiva de un experto**

Se realizó una entrevista a un experto sobre proceso productivo del açáí el cual él es el director de AMAPURI y CORPOCAMPO Edgar Montenegro que según la entrevista él menciona, la producción de açáí en Colombia se desarrolla principalmente bajo modelos asociativos y de recolección sostenible, involucrando a comunidades locales ubicadas en diferentes regiones de la Amazonía colombiana. Durante el proceso de transformación del fruto para la obtención de pulpa y jugos, se generan cantidades significativas de residuos orgánicos, principalmente cáscaras, semillas y aguas de lavado, los cuales actualmente no cuentan con un sistema integral de aprovechamiento.

Montenegro confirma que la fracción utilizable del fruto es muy baja, ya que la pulpa representa alrededor del 10% del peso total, mientras que aproximadamente el 90% corresponde a residuos agroindustriales, como semillas y fibras. A partir de estos datos, se estima que, por cada tonelada de fruto procesado, se generan cerca de 900 kilogramos de residuos sólidos. Esto evidencia un alto potencial de valorización de los subproductos del açáí, especialmente a través de tecnologías como la biodigestión anaerobia, el compostaje, la producción de biochar, o la obtención de sustratos fermentables, que permitirían transformar un flujo residual abundante en insumos energéticos, agrícolas o industriales de mayor valor agregado.

En el caso de aplicaciones agrícolas, Montenegro enfatizó que el aprovechamiento de estos subproductos debe alinearse con las directrices del Instituto Colombiano Agropecuario

(ICA) y las regulaciones municipales, particularmente cuando se busca su uso como enmiendas del suelo o bioinsumos certificados. Esto es especialmente importante en regiones amazónicas cuyos suelos se caracterizan por ser ácidos, pobres en materia orgánica y con concentraciones elevadas de aluminio en niveles tóxicos. Debido a estas condiciones, los suelos requieren correcciones constantes para mantener su productividad.

Por otro lado, el entrevistado describió el avance de los sistemas agroforestales implementados por AMAPURI y CORPOCAMPO en el departamento del Putumayo, financiados en parte por el gobierno noruego (Igreja et al., 2023).

Actualmente, se han establecido 1.500 hectáreas de sistemas agroforestales en zonas anteriormente degradadas por la ganadería, y se proyecta la siembra de 300 hectáreas adicionales para completar 1.800. Estos sistemas integran especies como açai, camu camu, aguaje, plátano y otros frutales, lo que permite recuperar suelos, diversificar los ingresos rurales y fortalecer la resiliencia ecológica y productiva. Además, se han mapeado 3.400 hectáreas de bosque natural donde el açai crece de manera silvestre, lo cual permite complementar la producción sin comprometer la integridad del ecosistema.

Actualmente, alrededor de 1.500 familias campesinas participan en el programa, cada una con al menos una hectárea productiva. El modelo permite ampliar la participación hacia nuevas familias, aunque Montenegro advirtió que esto debe hacerse bajo criterios logísticos claros, como la proximidad a vías transitables que faciliten el transporte. En particular, el traslado manual de las semillas, que constituyen la mayor proporción del residuo, es complejo y costoso cuando no se les otorga valor en la cadena productiva. Por ello, el entrevistado subraya la importancia de la

valorización del residuo, ya que transformar lo que hoy se considera “basura” en un insumo de valor permitiría incrementar los ingresos de los productores amazónicos.

Finalmente, Montenegro señaló que, pese a las barreras existentes, como la falta de infraestructura tecnológica, los costos logísticos elevados y la ausencia de incentivos normativos para la valorización de subproductos en zonas rurales amazónicas, existe un creciente interés por avanzar hacia modelos de economía circular. La transformación de los residuos del açaí en biogás, biofertilizantes, biochar o biomateriales representa una oportunidad para mejorar la sostenibilidad ambiental y fortalecer el desarrollo socioeconómico de las comunidades productoras.

En este contexto, la integración de la información técnica del Instituto SINCHI (Castro et al., 2015) y la visión de sostenibilidad aportada por Montenegro demuestra que, aunque el residuo del açaí presenta limitaciones en su biodegradabilidad natural, posee un alto potencial energético y socialmente transformador. La implementación de estrategias de valorización tecnológica, junto con pretratamientos físicos y químicos que mejoren la accesibilidad de su fracción biodegradable, permitiría convertir estos residuos en recursos clave para el desarrollo sostenible, la mitigación del cambio climático y la consolidación de cadenas productivas competitivas en la Amazonía colombiana.

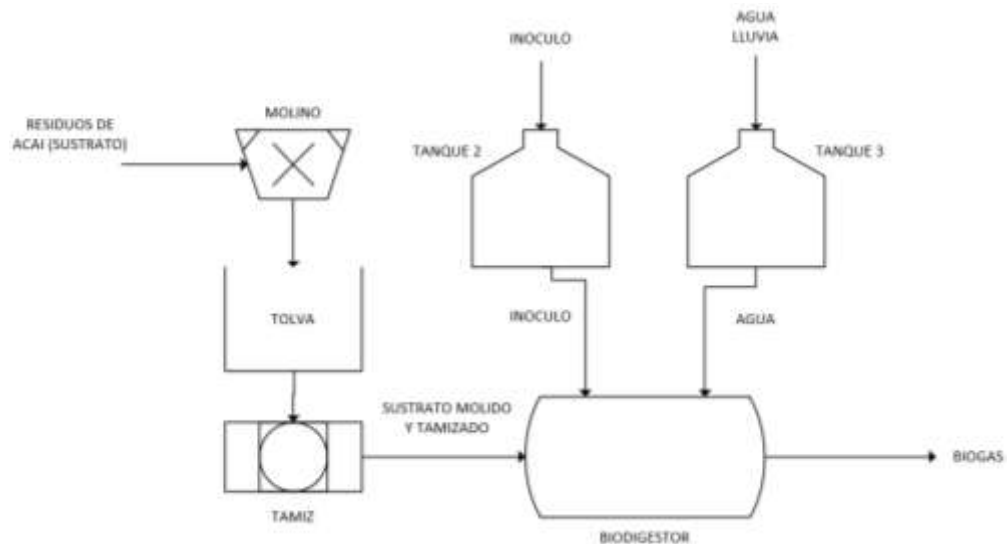
### **Análisis de la viabilidad técnica y económica del sistema**

Adicionalmente, previo al desarrollo experimental, se diseñó un esquema básico del proceso de biodigestión anaerobia, como se puede observar en la Figura 7, con el propósito de representar de manera general las etapas necesarias para el aprovechamiento energético de los residuos de açaí (*Euterpe Oleracea*). Este diseño busca servir como modelo replicable para su

implementación en comunidades rurales del departamento del Guaviare (Colombia), donde el acceso a energías limpias es limitado y la gestión inadecuada de residuos agroindustriales genera impactos ambientales negativos.

**Figura 7.**

*Diagrama proceso de biodigestión anaerobia del residuo de açaí*



*Nota.* El diagrama ilustra el flujo del proceso desde la preparación del sustrato hasta la producción de biogás. Elaboración propia.

El esquema se fundamenta en el principio de valorización de residuos orgánicos mediante procesos biotecnológicos sostenibles, con el fin de sustituir parcialmente los combustibles fósiles convencionales como el gas propano o la leña, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y promoviendo la transición energética justa y sostenible (Ministerio de Ambiente, 2025). Además, la iniciativa apoya los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 7: Energía asequible y no contaminante y el ODS 13:

Acción por el clima, impulsando la autonomía energética y el fortalecimiento de la economía circular local (Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible, 2023).

En el diagrama del proceso se observa la secuencia de operaciones: los residuos de açai, empleados como sustrato principal, son introducidos en un molino, donde se trituran hasta obtener una fracción homogénea. Posteriormente, el material pasa a una tolva que actúa como contenedor temporal antes del proceso de tamizado, cuya función es eliminar partículas gruesas o impurezas no biodegradables que podrían afectar la eficiencia del proceso anaerobio. Una vez preparado, el sustrato molido y tamizado se combina con el inóculo biológico, proveniente de estiércol porcino o lodos residuales de planta de tratamiento (PTAR), y con agua lluvia, la cual se incorpora desde un tanque auxiliar. Este último componente no solo ajusta la humedad del sistema, sino que también contribuye a mantener las condiciones anaerobias óptimas para la actividad microbiana metanogénica.

Finalmente, la mezcla se introduce en el biodigestor, donde ocurre la degradación anaerobia de la materia orgánica, dando lugar a la generación de biogás como producto principal y digestato como subproducto, el cual puede ser aprovechado posteriormente como biofertilizante orgánico. Este esquema resalta la simplicidad y bajo costo del sistema, lo que lo convierte en una alternativa viable para su adopción en zonas rurales del Guaviare, promoviendo la sostenibilidad ambiental y la seguridad energética comunitaria.

### **Viabilidad económica**

En cuanto al análisis de costos se plantea en un escenario de instalación del sistema en una zona rural del Guaviare, con el fin de estimar el costo de producción del biogás y los gastos asociados a su implementación. De esta forma se considera los costos de inversión directa e indirecta también los costos operativos del sistema. Estos valores se presentan en las tablas 6 y 7.

**Tabla 6.***Costos de inversión, costos directos e indirectos*

Costos de inversión		
Inversión directa		
Compra de maquinaria		
Equipos	Cantidades	Precios (\$ COP)
Geomembrana	1	1.185.120
Trituradora	1	2.152.079
Tolva	1	1.988.484
Zarandas	1	3.535.525
Manguera flexible	1	122.000
Tanques de recolección de agua de lluvia	1	314.142
Bomba solar	1	628.174
Filtro de tratamiento de H2S	2	449.800
Trampa de condensado	2	384.000
Minitractor de carga	1	3.877.621
Subtotal		14.636.945
Instalación y montaje		
Mano de obra técnica		2.800.000
Instalación		7.674.048
Subtotal		10.474.048
Total		25.110.993
Inversión indirecta		
Licencias ambientales		76.941
Capacitación a la comunidad		2.000.000
Imprevistos		1.255.550
Subtotal		3.332.491
Total inversión		28.443.484

*Nota.* La tabla presenta la estimación de los costos de inversión del sistema de generación de biogás todos los costos estimados están en pesos colombianos (COP). Elaboración propia.

**Tabla 7.**

*Costos operativos*

Costos operativos					
Mano de obra					
Personal	Cantidad	Perfil	Pago por hora (\$/h)	Día	Mes
Operario	1	Técnico en sistemas de biodigestión	\$ 6,471	\$ 25,884	\$ 776,520

*Nota.* La tabla muestra la estimación de los costos operativos asociados a la mano de obra requerida para la operación del sistema de biodigestión, indicando el perfil del personal, la remuneración por hora y su equivalente diario y mensual expresados en pesos colombianos (COP). Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 6, se presenta la inversión necesaria para la implementación del sistema de biodigestión en una zona rural del Guaviare. La inversión directa se incluye la adquisición de los equipos principales del sistema, los cuales estos precios fueron obtenidos gracias a algunas cotizaciones con empresas especializadas en la instalación y venta de implementos para estos sistemas como (Novatio-Plantas de Biogás y biodigestores., s. f.). En la misma lista se encuentra una bomba solar que permitirá garantizar el suministro de agua al biodigestor en caso de que el tanque de recolección de agua lluvia no se encuentre con volumen suficiente, usando una fuente hídrica cercana.

Los costos que están asociados con la instalación y el montaje del biodigestor fueron suministrados por la empresa (Novatio-Plantas de Biogás y biodigestores., s. f.) especializada en el diseño y construcción de sistemas de biodigestión.

Por otra parte, en la inversión indirecta se incorporan los gastos relacionados con licencias ambientales, cuyo valor se estimó con el documento de “cálculo de las tarifas por los servicios de evaluación y seguimiento de las licencias ambientales” del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de 2022 (Ministerio de ambiente, 2022), que indica las tarifas teniendo en cuenta que el costo del proyecto no supera los 30 SMLMV. Asimismo, se contemplan costos de capacitación a los miembros de la comunidad para la correcta operación del sistema y se tiene un costo de imprevistos que corresponde al 5% de la inversión directa, como una medida de mitigación ante posibles variaciones en la implementación.

Por último, se tiene en la tabla 7 los costos operativos que de acuerdo con el Salario Mínimo Legal Vigente de Colombia de 2025 el valor de la hora equivale a \$6,471 COP y contemplando que todas las operaciones para alimentar el biodigestor pueden ser de aproximadamente 4 horas al día se obtiene los costos al día y mes. Esto contempla entonces que el operario dedicara la mitad de su jornada en esta labor y el resto a otras labores que puede o no estar relacionadas a este equipo.

Para la estimación de variables económicas que permiten identificar la viabilidad económica del proyecto se considera importante estimar la Tasa Interna de Retorno (TIR) con el fin de evaluar la rentabilidad de la inversión junto con el Valor Actual Neto que es el que me indica el valor neto de dinero que espero obtener del proyecto (Fernández, 2025), por último también se estima el Retorno de la inversión (ROI) el cual esta métrica financiera que me permite comparar la ganancia obtenida con el costo de este (Blanco, 2023).

Así pues, primero se hace una estimación de generación de biogás con los kilogramos diarios que se suministraran al biodigestor de acuerdo de lo que se genera en las pruebas de laboratorio, para luego obtener anualmente y no solo se analiza el acaí, también se analiza el

palmito esto debido a que anualmente la mayor generación de açai es en el primer cuatrimestre del año y el restante del año es necesario abastecer el biodigestor y para suplir las cantidades de açai se realizaría con el palmito así pues se tiene las siguientes estimaciones

### **Açai**

$$160 \frac{kg}{día} * \frac{120 días}{mes} = 19200 \frac{kg}{4 meses}$$

En kg/mes se obtiene 19200 kg/4meses de açai

### **Relación**

$$\frac{19200 \frac{kg}{4 meses} açai * 0,000273 m^3 CH_4}{0,004 kg de açai} = 1310,40 \frac{m^3 CH_4}{4 meses}$$

En la anterior ecuación es la estimación de producción de biogás al suministrar 19200 kg de açai al biodigestor durante 4 meses que son los meses que más se producirá residuos de açai

### **Palmito**

$$160 \frac{kg}{día} * \frac{240 días}{mes} = 38400 \frac{kg}{8 meses}$$

En kg/mes se obtiene 38400 kg/ 8 meses de palmito

### **Relación**

$$\frac{38400 \frac{kg}{8 meses} palmito * 0,000259 m^3 CH_4}{0,004 kg de palmito} = 2486,40 \frac{m^3 CH_4}{8 meses}$$

De la anterior ecuación se obtiene la cantidad de biogás de 8 meses a partir de los residuos del palmito, de esta forma para obtener el biogás producido en 1 año se suma los anteriores resultados.

$$1310,40 \frac{m^3 CH_4}{4 meses} + 2486,40 \frac{m^3 CH_4}{8 meses} = 3796,80 \frac{m^3 CH_4}{año}$$

En cuanto al total de residuo anuales es la suma del açai y del palmito

$$19200 \frac{kg}{4 \text{ meses}} + 38400 \frac{kg}{8 \text{ meses}} = 57600 \frac{kg}{año}$$

Teniendo en cuenta los anteriores cálculos estos se realizaron con una estimación de al día se suministrarán 160 kg de residuo y con base a esto se obtuvo los anteriores resultados que permiten estimar la proyección económica del proyecto a 10 años y también lograr estimar indicadores económicos que destacan la rentabilidad del proyecto estas estimaciones se pueden analizar en la tabla 8 y 9.

**Tabla 8.**

*Proyección financiera del proyecto a 10 años*

Año	Ingreso biogás anual	Mantenimiento	Flujo neto
			-28.443.484
1	5.740.761,00	1.355.993,62	4.384.767,38
2	6.200.021,88	1.464.473,11	4.735.548,77
3	6.696.023,63	1.581.630,96	5.114.392,67
4	7.231.705,52	1.708.161,44	5.523.544,08
5	7.810.241,96	1.844.814,35	5.965.427,61
6	8.435.061,32	1.992.399,50	6.442.661,82
7	9.109.866,23	2.151.791,46	6.958.074,76
8	9.838.655,52	2.323.934,78	7.514.720,75
9	10.625.747,96	2.509.849,56	8.115.898,40
10	11.475.807,80	2.710.637,52	8.765.170,28

*Nota.* Proyección financiera del proyecto a un horizonte de 10 años, considerando ingresos

anuales por la generación de biogás, los costos de mantenimiento y flujo neto todo expresado en pesos colombianos (COP). Elaboración propia.

**Tabla 9.**

*Indicadores financieros del proyecto*

VAN	\$ 52.529.549
TIR	16%
ROI	123%

*Nota.* Principales indicadores financieros del proyecto, como Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Retorno sobre la Inversión (ROI) usados para evaluar la viabilidad económica del proyecto. Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 9, la TIR del 16% indica que el proyecto genera una tasa de retorno anual superior al costo de oportunidad esperado para iniciativas rurales, lo que lo convierte en una inversión atractiva, especialmente al tratarse de un proyecto con enfoque social. El ROI del 123% enfatiza este análisis, pues demuestra que la inversión inicial prácticamente se duplica a lo largo del periodo evaluado. También, el VAN positivo de \$52.529.549 COP evidencia que el proyecto genera beneficios netos significativos, confirmando su solidez y viabilidad económica.

### **Oportunidades de valorización tecnológica del residuo de açaí**

Una de las alternativas más prometedoras para los residuos del açaí es la producción de biochar a partir de las semillas y la fracción lignocelulósica del residuo del açaí. Montenegro, (2025) explicó que el biochar cumple una doble función: mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo, como la retención de nutrientes, la reducción de la acidez y la mejora de la estructura del suelo, y actúa como soporte para biofertilizantes y microorganismos benéficos, favoreciendo la descomposición y el ciclado de nutrientes. Además, el biochar tiene la capacidad de capturar y retener carbono, lo que abre la posibilidad de vincular a los productores amazónicos a esquemas de bonos de carbono. Para ello, sería necesario desarrollar un Documento de Diseño de Proyecto (PDD) de prefactibilidad que permita presentar la iniciativa ante entidades certificadoras del mercado voluntario de carbono.

Montenegro (2025) también destacó el potencial industrial de los subproductos del açaí. Comentó que, en países como México, el biochar y otros extractos derivados de la semilla se están empleando como insumos para la industria cosmética e incluso pueden tener aplicaciones en el sector farmacéutico, debido a su alta pureza y estabilidad. Esto abre nuevas líneas de

investigación con alto valor agregado para las áreas de ingeniería química, bioingeniería y biotecnología.

Del mismo modo, otra alternativa prometedora para el aprovechamiento de los residuos de açáí es su uso en la elaboración de películas biodegradables, ya que el fruto posee un alto contenido de antioxidantes y pigmentos naturales, principalmente antocianinas las cuales aportan propiedades importantes a los biopolímeros. Estos compuestos intensifican el color de la película y mejoran su capacidad como barrera frente a la luz, lo que beneficia la protección de alimentos sensibles a la fotodegradación, como aquellos que presentan degradación del betacaroteno. De igual forma, los antioxidantes presentes en el açáí se comportan como agentes activos que prolongan la vida útil de los alimentos al reducir procesos oxidativos y microbiológicos. En cuanto a temas mecánicos al incorporar açáí en matrices como el almidón de yuca genera estructuras poliméricas más compactas mediante interacciones por enlaces de hidrógeno, permitiendo incrementar la resistencia a la tracción y el alargamiento. También, el material presenta mejoras en propiedades relacionadas con el agua, como la disminución de la absorción y la permeabilidad al vapor, aumentando la cohesión interna y reduciendo la solubilidad. Por último las películas biodegradables enriquecidas con açáí demuestran una buena estabilidad térmica y una biodegradación rápida en el suelo, características que convierten a este residuo en un componente idóneo para el desarrollo de biopelículas funcionales orientadas al envasado activo de alimentos (Maciel et al., 2025).

## CONCLUSIONES

[1] Los resultados obtenidos en la fase experimental demostraron que la digestión anaerobia de residuos agroindustriales de açai y palmito constituye una alternativa técnica, ambiental y económicamente viable para la generación de biogás en comunidades rurales del departamento del Guaviare.

[2] El análisis comparativo evidenció que la biomasa residual del açai posee un potencial limitado para la producción directa de biogás debido a su alto contenido de sólidos totales (59,21 %) y baja fracción de sólidos volátiles (1,06 %), lo que indica una composición predominantemente lignocelulósica y de baja biodegradabilidad. En contraste, el residuo de palmito presentó una mayor proporción de materia orgánica fácilmente degradable (9,20 % de SV y 13,96 % de ST), alcanzando volúmenes de producción de metano ( $\text{CH}_4$ ) entre 100 y 130 ml hacia el octavo día de retención, mientras que el açai apenas alcanzó valores cercanos a los 40–50 ml. Esta diferencia se asocia a la mayor fracción orgánica disponible y a una estructura más accesible del palmito, que favorece la actividad microbiana y la conversión de materia orgánica en gas.

[3] En cuanto al inóculo, el estiércol de cerdo demostró una eficiencia superior frente a los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), impulsando una mayor y más estable producción de metano gracias a su elevada carga microbiana activa y aporte equilibrado de nutrientes esenciales para las etapas de hidrólisis y metanogénesis. Asimismo, las relaciones sustrato/inóculo 1:1 y 1:2 resultaron ser las más efectivas, ya que permitieron un equilibrio adecuado entre la carga orgánica y la actividad microbiológica, reduciendo los efectos inhibitorios por acumulación de ácidos grasos volátiles y favoreciendo una conversión más eficiente de la materia orgánica en biogás.

[4] El esquema propuesto para la producción de biogás, basado en un sistema modular con molino, tamiz, tanques de inoculación y biodigestor, representa una solución de bajo costo, replicable y adaptada a las condiciones socioambientales del Guaviare. Este sistema posee un alto potencial para sustituir gradualmente los combustibles fósiles convencionales, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y generar subproductos útiles como el digestato, aprovechable como biofertilizante dentro de un modelo de economía circular rural.

[5] Desde el punto de vista técnico, los resultados confirman que la digestión anaerobia de residuos agroindustriales del Guaviare es viable, siempre que se apliquen pretratamientos fisicoquímicos o enzimáticos al açaí para mejorar su degradabilidad. En términos económicos, el análisis financiero proyectado a diez años arrojó un Valor Actual Neto (VAN) positivo de \$39.931.593 COP, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 6 % y un Retorno sobre la Inversión (ROI) del 44 %, indicadores que reflejan una rentabilidad moderada y sostenibilidad económica del sistema en contextos rurales.

[6] En conjunto, la investigación demuestra que la valorización energética de residuos orgánicos mediante biodigestores comunitarios no solo mejora la sostenibilidad ambiental y energética, sino que también fortalece la autonomía local y promueve la transición hacia sistemas energéticos más limpios y resilientes. Esta iniciativa contribuye directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 7 (Energía asequible y no contaminante) y 13 (Acción por el clima), al tiempo que representa una alternativa estratégica para reducir la pobreza energética, aprovechar los residuos agroindustriales y fomentar la economía circular en el territorio del Guaviare.

## REFERENCIAS

- Agriculture and Natural Resources. (2018, junio 15). Economic Implications of Anaerobic Digestion for Bioenergy Production and Waste Management. <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-6611>.
- Alburquerque, J. A., de la Fuente, C., Campoy, M., Carrasco, L., Nájera, I., Baixauli, C., Caravaca, F., Roldán, A., Cegarra, J., & Bernal, M. P. (2012). Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties. *European Journal of Agronomy*, 43, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.06.001>
- 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>
- Amaral, L. S., Potrich, E., & Abreu, J. C. de. (2023). De Resíduos a Recursos: Generación de Energía en la Amazonía a través de la Gasificación del Açaí - Un Estudio In Silico con EMSO. *Anais do(a) Anales del II Congreso Euroamericano de Procesos y Productos Alimentarios*. <https://doi.org/10.29327/1334782.2-17>
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452-466. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- Bigarelli Ferreira, M., Vetroni Barros, M., Alexis Ramos Huarachi, D., & Moro Piekarski, C. (s. f.). *Biogás en la agroindustria y sus oportunidades para la Economía Circular*. Recuperado 16 de septiembre de 2025, de <https://www.researchgate.net/publication/341685951>

*Biodigestores: Innovación sostenible para la agricultura y ganadería.* (2024).

<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/biodigestores-innovacion-sostenible-para-la-agricultura-y-ganaderia?idiom=es>

*Biogás mejora la calidad de vida en zonas rurales de Colombia.* (2024).

<https://naturgas.com.co/biogas-mejora-la-calidad-de-vida-en-zonas-rurales-de-colombia/>

Blanco, E. (2023, octubre 7). *ROI – Retorno de la Inversión.*

<https://www.rdstation.com/blog/es/roi/>.

Buratto, R. T., Cocero, M. J., & Martín, Á. (2021). Characterization of industrial açai pulp residues and valorization by microwave-assisted extraction. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 160, 108269.

<https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108269>

Canchila Benítez, A., Amador Sanabria, M., Jiménez Gómez, C., Arteta Chedraüy, P., Yepes-Martínez, J., & González-Quiroga, A. (2022). Diseño de un sistema de digestión anaerobia para la obtención de biogás y bioabono en una granja avícola de la región caribe colombiana. *Revista Ing-Nova*, 1(1), 43-65. <https://doi.org/10.32997/rin-2022-3727>

*Caracterización de la Oferta Energética Guaviare.* (2021).

[https://docs.upme.gov.co/SIMEC/PERS/Guaviare/Documento\\_Oferta\\_Energetica\\_versi%C3%B3n\\_final\\_Guaviare\\_seg.pdf](https://docs.upme.gov.co/SIMEC/PERS/Guaviare/Documento_Oferta_Energetica_versi%C3%B3n_final_Guaviare_seg.pdf)

Cárdenas Cleves, L. M., Parra Orobio, B. A., Torres Lozada, P., & Vásquez Franco, C. H.

(2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Revista ION*, 29(1), 95-108.

<https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>

Castro, S. Y., Jaime, B., Marcela, C., & María, H. (2015). *Cadena de valor en el sur de la región amazónica*. [www.sinchi.org.co](http://www.sinchi.org.co)

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2023). *Panorama de los recursos naturales en América Latina y el Caribe*.  
[www.issuu.com/publicacionescepal/stacks](http://www.issuu.com/publicacionescepal/stacks)

Cooke, J., Girault, R., Busnot, S., Morvan, T., & Menasseri-Aubry, S. (2023). Characterising the Effect of Raw and Post-Treated Digestates on Soil Aggregate Stability. *Waste and Biomass Valorization*, 14(9), 2977-2995. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02045-3>

Costo de la energía eléctrica se ha incrementado hasta 32 % en las empresas del país: alarma en el sector privado. (2024). *Semana*.

da Silva, C. de M. S., de Castro, D. A. R., Santos, M. C., Almeida, H. da S., Schultze, M., Lüder, U., Hoffmann, T., & Machado, N. T. (2021). Process Analysis of Main Organic Compounds Dissolved in Aqueous Phase by Hydrothermal Processing of Açaí (*Euterpe oleracea*, Mart.) Seeds: Influence of Process Temperature, Biomass-to-Water Ratio, and Production Scales. *Energies*, 14(18), 5608. <https://doi.org/10.3390/en14185608>

Departamento Nacional de Planeación. (2025, julio 7). *El DNP y el Ministerio de Minas le apuestan al cierre de brechas en cobertura y calidad del servicio de energía eléctrica en el país*. [https://www.dnp.gov.co/Prensa\\_/Noticias/Paginas/dnp-ministerio-minas-apuestan-cierre-brechas-cobertura-calidad-servicio-energia-electrica-pais.aspx](https://www.dnp.gov.co/Prensa_/Noticias/Paginas/dnp-ministerio-minas-apuestan-cierre-brechas-cobertura-calidad-servicio-energia-electrica-pais.aspx).

Díaz, J. (2024). *Sistemas de energías renovables* (S. A. Ediciones Paraninfo, Ed.; 2.<sup>a</sup> edición 2024).

*Digestate Fertilizer Value*. (2025, mayo 12). <https://energy.sustainability-directory.com/term/digestate-fertilizer-value>.

Equipe GNPW Group. (2024, julio 4). The Role of Biogas in the Circular Economy Revolution.

<https://www.gnpw.com.br/en/renewable-energy/the-role-of-biogas-in-the-circular-economy-revolution/>.

Esquivel García, C. L., & Toro-García, G. L. (2024). Multidimensional energy poverty in

Colombia: A department-level review from 2018 to 2022. *Heliyon*, 10(14), e34395.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34395>

FEDEGAN. (2018, abril 6). *Alto costo de la energía en Colombia destruye la competitividad del*

*campo*. <https://www.fedegan.org.co/noticias/alto-costo-de-la-energia-en-colombia-destruye-la-competitividad-del-campo>.

Fernández, J. (2025, marzo 31). *Tasa interna de retorno (TIR)*. [https://www.sage.com/es-](https://www.sage.com/es-es/blog/tasa-interna-de-retorno-tir-que-es-y-como-se-calcula/)

[es/blog/tasa-interna-de-retorno-tir-que-es-y-como-se-calcula/](https://www.sage.com/es-es/blog/tasa-interna-de-retorno-tir-que-es-y-como-se-calcula/).

Garcia-Vallejo, M. C., Poveda-Giraldo, J. A., & Cardona Alzate, C. A. (2023). Valorization

Alternatives of Tropical Forest Fruits Based on the Açai (*Euterpe oleracea*) Processing in

Small Communities. *Foods*, 12(11), 2229. <https://doi.org/10.3390/foods12112229>

Guillot, J. (2023). *Economía circular: definición, importancia y beneficios* | Noticias |

*Parlamento Europeo*.

[https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-](https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios)

[definicion-importancia-y-beneficios](https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios)

Igreja, W., da Silva Martins, L., de Almeida, R., de Oliveira, J., Lopes, A., & Chisté, R. (2023).

Açai Seeds (*Euterpe oleracea* Mart) Are Agroindustrial Waste with High Potential to

Produce Low-Cost Substrates after Acid Hydrolysis. *Molecules*, 28(18), 6661.

<https://doi.org/10.3390/molecules28186661>

IMPE. (s. f.). *El 18.5% de la población en Colombia se encuentra en situación de pobreza energética*. <https://www.pactoglobal-colombia.org/news/el-18-5-de-la-poblacion-en-colombia-se-encuentra-en-situacion-de-pobreza-energetica.html>.

InclusiónSAS & Promigas S.A. E.S.P. (2023). *Energía que impulsa el desarrollo: Índice Multidimensional de pobreza energética en Colombia*.  
<https://fundacionpromigas.org.co/impe/>.

Khadka, A., Parajuli, A., Dangol, S., Thapa, B., Sapkota, L., Carmona-Martínez, A. A., & Ghimire, A. (2022). Effect of the Substrate to Inoculum Ratios on the Kinetics of Biogas Production during the Mesophilic Anaerobic Digestion of Food Waste. *Energies*, *15*(3), 834. <https://doi.org/10.3390/en15030834>

Lamolinará, B., Pérez-Martínez, A., Guardado-Yordi, E., Guillén Fiallos, C., Diéguez-Santana, K., & Ruiz-Mercado, G. J. (2022). Anaerobic digestate management, environmental impacts, and techno-economic challenges. *Waste Management*, *140*, 14-30.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.035>

León Velásquez, E. (2024). *Validación e implementación de sistemas mixtos de generación de energías renovables para el desarrollo de MiPymes*.

Ley 1715, Legislation 1715,  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353> (2014).  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

Lipps WC, Baxter TE, & Braun-Howland E. (Eds.). (2000). *PROPIEDADES FÍSICAS Y AGREGADAS DEL AGUA Y LAS AGUAS RESIDUALES*.

Lukehurst, C., & Frost, P. (s. f.). *Utilisation of digestate from biogas plants as biofertiliser*.

Maciel, F. S., Assis, R. Q., Rios, A. de O., & Pertuzatti, P. B. (2025). Açai powder-enriched biodegradable starch films: Characterization, release in food simulants and protective effect in photodegradation system. *International Journal of Biological Macromolecules*, 308, 142420. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142420>

Mendieta, O., Castro, L., Escalante, H., & Garfí, M. (2021). Low-cost anaerobic digester to promote the circular bioeconomy in the non-centrifugal cane sugar sector: A life cycle assessment. *Bioresource Technology*, 326, 124783. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124783>

Ministerio de ambiente. (2020, julio 13). *Asaí: una oferta del bosque*. <https://visionamazonia.minambiente.gov.co/news/asai-una-oferta-del-bosque/>.

Ministerio de ambiente. (2022). *Cálculo de las tarifas por los servicios de evaluación y seguimiento de las licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y demás instrumentos de manejo y control ambiental para proyectos*. [https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2024/09/concep\\_230824\\_028772-CALCULO-TARIFAS-SERVICIOS-DE-EVALUACION-Y-SEGUIMIENTO-DE-LICENCIAS-AMBIENTALES-CONCESIONES-Y-AUTORIZACIONES.pdf](https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2024/09/concep_230824_028772-CALCULO-TARIFAS-SERVICIOS-DE-EVALUACION-Y-SEGUIMIENTO-DE-LICENCIAS-AMBIENTALES-CONCESIONES-Y-AUTORIZACIONES.pdf)

Ministerio de Ambiente. (2025). *Ministerio de Ambiente*. <https://www.minambiente.gov.co/>. *Ministerio de Minas y Energía prepara CONPES para llegar a los territorios con mayor pobreza energética del país*. (2025).

Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), 242-257. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100085>

Moraes, J. E. de, Reis, T. L., Fuzitani, E. J., Damatto Júnior, E. R., Maioli, C. M. T., Soares, W.

V. B., Bueno, M. S., & Paulino, V. T. (2022a). In natura residues from peach palm heart industry for ruminant feed. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 44, e54712.

<https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v44i1.54712>

Moraes, J. E. de, Reis, T. L., Fuzitani, E. J., Damatto Júnior, E. R., Maioli, C. M. T., Soares, W.

V. B., Bueno, M. S., & Paulino, V. T. (2022b). In natura residues from peach palm heart industry for ruminant feed. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 44, e54712.

<https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v44i1.54712>

More, O. (2018, junio 13). *Why anaerobic digestion? A summary*.

<https://adbioresources.org/newsroom/why-anaerobic-digestion-a-summary/>.

Naciones Unidas. (s. f.-a). *Energías renovables: energías para un futuro más seguro*.

Recuperado 10 de agosto de 2025, de <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>

Naciones Unidas. (s. f.-b). *¿Qué son las energías renovables?* Recuperado 10 de agosto de 2025,

de <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy>

*Novatio-Plantas de Biogás y biodigestores*. (s. f.). <https://novatio.com.co/>.

*Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. (2023). <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>.

Panuccio, M. R., Romeo, F., Mallamaci, C., & Muscolo, A. (2021). Digestate Application on

Two Different Soils: Agricultural Benefit and Risk. *Waste and Biomass Valorization*, 12(8),

4341-4353. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01318-5>

Portafolio. (2023, septiembre 17). *Una de cada cinco personas en el país está en pobreza energética*. <https://www.portafolio.co/energia/hay-9-6-millones-de-habitantes-en-pobreza-energetica-589086>.

RESOLUCIÓN 240, Legislation 240,

[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_0240\\_2016.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0240_2016.htm) (2016).

[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_0240\\_2016.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0240_2016.htm)

Reyes Plascencia, C., Mora, K., & Tancredi, N. (2024). Bioenergía y desarrollo sostenible: Alternativas en la producción de biocombustibles. En *GEOS* (Vol. 44, Número 2).

Seruga, P., Krzywonos, M., den Boer, E., Niedźwiecki, Ł., Urbanowska, A., & Pawlak-Kruczek, H. (2022). Anaerobic Digestion as a Component of Circular Bioeconomy—Case Study Approach. *Energies*, *16*(1), 140. <https://doi.org/10.3390/en16010140>

Shah, S. V., Yadav Lamba, B., Tiwari, A. K., & Chen, W.-H. (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>

Shanley, P. (2004). *Productos forestales, medios de subsistencia y conservacion: estudios de caso sobre sistemas de manejo de productos forestales no maderables. Volumen 3*.

Sharifi, M., Baker, S., Hojabri, L., & Hajiaghahi-Kamrani, M. (2019). Short-term nitrogen dynamics in a soil amended with anaerobic digestate. *Canadian Journal of Soil Science*, *99*(2), 173-181. <https://doi.org/10.1139/cjss-2018-0060>

Silva, D. A. D. da, Marinho, C. C. do P., Silva, M. C. D., Santos, N. A. dos, Ferreira, A. L. de O., & Silva, G. F. da. (2023). AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA BIOMASSA DE AÇAÍ

- (EUTERPE OLERACEA MART.) PARA PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO. En *Anais do II Congresso da Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Sustentáveis de Aviação* (pp. 86-88). Editora Científica Digital. <https://doi.org/10.37885/230914445>
- ST Green Power. (2024, diciembre 30). *The benefits of anaerobic digestion*. <https://www.stgreenpower.co.uk/insight/the-benefits-of-anaerobic-digestion>.
- Teixeira, T. A., & Mendes, F. B. (2023). Valorização dos resíduos da agroindústria de beneficiamento do açaí: Uma revisão. *Research, Society and Development*, 12(11), e126121143799. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i11.43799>
- Tröster, M. F. (2023). Assessing the Value of Organic Fertilizers from the Perspective of EU Farmers. *Agriculture*, 13(5), 1057. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051057>
- United States Environmental Protection Agency. (2025, enero 7). *Environmental Benefits of Anaerobic Digestion (AD)*. <https://www.epa.gov/anaerobic-digestion/environmental-benefits-anaerobic-digestion-ad>.
- United States Environmental Protection Agency. (2025, marzo 5). *The Benefits of Anaerobic Digestion*. <https://www.epa.gov/agstar/benefits-anaerobic-digestion>.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2025, octubre 1). *Basic Information about Anaerobic Digestion*.
- Valentin, M. T., Ciolkosz, D., & Białowiec, A. (2024). Influence of inoculum-to-substrate ratio on biomethane production via anaerobic digestion of biomass. *Environmental Microbiology Reports*, 16(6). <https://doi.org/10.1111/1758-2229.70009>
- Velásquez-Piñas, J. A., Calle-Roalcaba, O. D., Miramontes-Martínez, L. R., & Alonso-Gómez, L. A. (2023). Evaluación económica y ambiental de las tecnologías de utilización del biogás

y perspectivas del análisis multicriterio. *Revista ION*, 36(1).

<https://doi.org/10.18273/revion.v36n1-2023003>

Zapata, A. (2023, septiembre 13). *1 de cada 5 colombianos no cuenta con capacidad de pago, conexión o bienes para acceder a la electricidad.*

<https://www.elcolombiano.com/negocios/el-185-de-la-poblacion-en-colombia-se-encuentra-en-situacion-de-pobreza-energetica-DF22365655>.