



**Análisis de ciclo de vida (ACV) de la producción de biogás a partir de residuos de açáí  
(*Euterpe precatoria*) en el departamento del Guaviare**

**Laura Daniela Martin Muñoz**

**Laura Andrea Nova Bello**

**Universidad Ean**

**Facultad de ingeniería**

**Ingeniería Química**

**Bogotá, Colombia**

**2025**

**Análisis de ciclo de vida (ACV) de la producción de biogás a partir de residuos de açai  
(*Euterpe precatoria*) en el departamento del Guaviare**

**Laura Daniela Martin Muñoz**

**Laura Andrea Nova Bello**

**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, Colombia**

**2025**

### **Resumen**

El presente trabajo se centra en el análisis de ciclo de vida (ACV) del aprovechamiento de los residuos del procesamiento del açai para la producción de biogás en el departamento del Guaviare. Es un problema de interés debido a los impactos ambientales ocasionados por la mala gestión de los residuos orgánicos provenientes del açai y la necesidad de diversificar las fuentes de energía renovables, ya que en el Guaviare se procesan aproximadamente 1.746 toneladas anuales de açai, generando cerca de 1.571 toneladas de residuos (90% del fruto), compuestos principalmente por cáscaras y semillas que actualmente carecen de aprovechamiento adecuado. Esta situación no solo representa una pérdida de recursos energéticos potencialmente utilizables, sino que también contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero, degradación del suelo y alteración de ecosistemas.

El propósito principal se centra en la evaluación de los impactos ambientales identificando las fases críticas y opciones para la optimización del ciclo de vida. Se incluye la recolección de datos por medio de fuentes de información como la entrevista realizada al señor Edgar Montenegro CEO de la empresa AMAPURI, modelado del proceso y análisis a través de software especializado para análisis de ciclo de vida ACV (Simapro) conforme a las normas ISO 14040-14044. Además, la investigación se desarrolló mediante un enfoque metodológico mixto que integró datos cuantitativos (balances de masa y energía, modelado en SimaPro) con información cualitativa obtenida a través de entrevistas con expertos del sector.

**Palabras clave:** ACV, açai, Digestión anaeróbica, Biogás, departamento del Guaviare.

### **ABSTRACT**

This work focuses on the life cycle assessment (LCA) of utilizing açai processing waste for biogas production in the department of Guaviare. This is a problem of interest due to the environmental impacts caused by the poor management of organic waste from açai and the need to diversify renewable energy sources. Approximately 1,746 tons of açai are processed annually in Guaviare, generating around 1,571 tons of waste (90% of the fruit), composed mainly of peels and seeds that currently lack adequate utilization. This situation not only represents a loss of potentially usable energy resources but also contributes to greenhouse gas emissions, soil degradation, and ecosystem disruption.

The main objective is to evaluate the environmental impacts by identifying critical phases and options for optimizing the life cycle. Data collection was included through information sources such as the interview conducted with Mr. Edgar Montenegro, CEO of the company AMAPURI, process modeling, and analysis using specialized software for life cycle assessment (LCA) (SimaPro) in accordance with ISO 14040-14044 standards. In addition, the research was developed using a mixed methodological approach that integrated quantitative data (mass and energy balances, modeling in SimaPro) with qualitative information obtained through interviews with experts in the sector.

**KEYWORDS:** LCA, açai, anaerobic digestion, Biogás, Guaviare department.

## Tabla de contenido

Lista de figuras .....	7
Lista de Tablas .....	7
Introducción .....	8
Objetivos .....	10
Objetivo General .....	10
Objetivos Específicos.....	10
Definición del problema.....	11
Justificación.....	12
Análisis de requerimientos.....	15
Marco teórico .....	17
¿Qué es el açáí?.....	17
Açáí en el Guaviare.....	17
Proceso productivo del açáí .....	18
Residuos del açáí.....	20
Biodigestor .....	20
Digestato .....	21
Biogás.....	22
Etapas de la biodigestión.....	22
Análisis de ciclo de vida (ACV) .....	23
Etapas del ACV.....	24

<b>Análisis de ciclo de vida (ACV) de la producción de biogás a partir de los residuos de açái (<i>Euterpe precatoria</i>) en el departamento del Guaviare</b>	<b>6</b>
Aplicaciones del ACV en la industria.....	25
Análisis de restricciones.....	26
Metodología para la selección y desarrollo de la solución .....	30
Alcance de la investigación.....	30
Diseño de la investigación .....	31
Etapas de la investigación .....	31
Etapa 1. Caracterización del proceso .....	32
Etapa 2. Evaluación de impactos .....	33
Etapa 3. Estrategias de aprovechamiento.....	33
Etapa 4. Viabilidad económica .....	34
Resultados .....	36
Etapa 1. Caracterización del proceso .....	36
Etapa 2. Evaluación de impactos .....	49
Etapa 3. Estrategias de aprovechamiento y caso de éxito.....	53
Etapa 4. Viabilidad económica .....	54
Conclusiones .....	57
Referencias.....	59
Anexos .....	69

### Lista de figuras

<b>Figura 1</b>	Imagen ilustrativa del açai en la amazonia.....	17
<b>Figura 2</b>	Proceso del açai .....	18
<b>Figura 3</b>	Funcionamiento de un biodigestor .....	21
<b>Figura 4</b>	Etapas en el desarrollo de la investigación.....	32
<b>Figura 5</b>	Diagrama de proceso producción de Biogás .....	36
<b>Figura 6</b>	Diagrama final de proceso de producción de biogás con açai (Euterpe precatoria) .....	49
<b>Figura 7</b>	Caracterización detallada (19 subcategorías) .....	51
<b>Figura 8</b>	Impactos por categorías (Human health, ecosystems, resources) .....	52

### Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b>	Composición elemental de los residuos de açai (base seca). .....	37
<b>Tabla 2</b>	Potencial teórico y experimental de metano .....	38
<b>Tabla 3</b>	Cantidad total de gases por 1 mol de residuo.....	39
<b>Tabla 4</b>	Fracción másica (%) componentes del biogás en 1 mol. ....	41
<b>Tabla 5</b>	Moles reales, fracción másica (%), masa (kg) reales por la cantidad de entrada	42
<b>Tabla 6</b>	Inversión Directa (ID) .....	54
<b>Tabla 7</b>	Inversión indirecta (Ii).....	55
<b>Tabla 8</b>	Inversión total (It) .....	55
<b>Tabla 9</b>	Ingresos diarios y anuales por Biogás y Biol.....	56
<b>Tabla 10</b>	Criterios de evaluación económica (VAN, TIR) .....	56

## **Introducción**

La región amazónica colombiana alberga una extraordinaria biodiversidad, la cual incluye especies vegetales con alto potencial económico y nutricional, entre estas especies se destaca el açáí (*Euterpe oleracea mart*); una palma, tradicionalmente consumida por comunidades indígenas, que ha experimentado un crecimiento exponencial en su demanda global debido a sus propiedades antioxidantes y valor nutricional excepcional.

Sin embargo, la producción de açáí genera grandes cantidades de residuos orgánicos (p. ej. pulpa, cáscaras y semillas) que en realidad no son aprovechados adecuadamente, lo cual provoca impactos ambientales negativos significativos. Estos al ser desechados en el ambiente pueden contribuir a la contaminación del suelo y del agua, así como a la emisión de gases de efecto invernadero debido a su descomposición no controlada.

En el departamento del Guaviare, el cultivo y procesamiento de açáí representa una actividad económica emergente que involucra principalmente a los pequeños productores rurales y comunidades étnicas. No obstante, el procesamiento agroindustrial del açáí ha generado significativos volúmenes de residuos orgánicos que no tienen disposición final adecuada; problemática que trasciende lo ambiental, ya que también es una pérdida de recursos energéticos aprovechables.

Asimismo, en el Guaviare, la presión sobre el medio ambiente incluye la deforestación, la expansión de la frontera agrícola, la ganadería extensiva y otros factores que agravan la degradación ambiental, amenazando la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de la región amazónica, una de las áreas con mayor riqueza biológica y función reguladora del clima global.

La digestión anaerobia, los residuos de açáí pueden convertirse en biogás, una fuente de energía renovable y limpia compuesta principalmente por metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Este es un proceso que permitirá transformar un problema ambiental en una

oportunidad para generar energía local sostenible, reducir la emisión de contaminantes atmosféricos, y aprovechar los subproductos como biofertilizantes, reduciendo así a la necesidad de fertilizantes químicos y previniendo la contaminación del suelo y fuentes hídricas. Además, una implementación de sistemas de biogás en el Guaviare puede ayudar a mitigar la contaminación que actualmente afecta el área y a su vez fortalecer las economías rurales mediante el uso eficiente de los residuos agroindustriales.

Por ello, el ACV o análisis de ciclo de vida aplicado a esta cadena productiva permite evaluar de manera integral los impactos ambientales, sociales y económicos relacionados con todo el proceso, desde la recolección y manejo de residuos hasta el aprovechamiento del biogás y la gestión de los restos resultantes. Este enfoque permite la identificación de los beneficios tangibles, como la reducción significativa de gases de efecto invernadero frente a la disposición tradicional de residuos, también los posibles impactos negativos locales, como la acidificación y eutrofización, derivadas de un manejo inadecuado de los efluentes líquidos. Por ello, el ACV es una herramienta esencial para orientar políticas y estrategias que promuevan la transición hacia un modelo energético sostenible en la región, compatible con la conservación ambiental y el desarrollo social de las comunidades involucradas.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar los impactos ambientales asociados a la producción de biogás a partir de los residuos provenientes de açai (*Euterpe precatoria*) en el departamento del Guaviare mediante la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV), con el fin de identificar factores de mejora, mitigación e incrementos en el rendimiento.

### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar el proceso productivo del açai en el departamento del Guaviare, analizando las fases de cultivo, recolección, procesamiento y producción de residuos con el fin de obtener un diagnóstico de la condición actual y la disponibilidad de materia prima para la obtención de biogás.
- Determinar los impactos ambientales derivados de la producción de biogás a partir de los residuos del açai, aplicando la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV) bajo las normas ISO 14040-14044.
- Proponer estrategias de aprovechamiento del residuo del açai por medio de la recolección de información contextual a actores relacionados con el residuo del açai y zonas aledañas al Guaviare.
- Evaluar la viabilidad económica de implementar un sistema de generación de biogás a partir de los residuos de açai en el Guaviare teniendo en cuenta la disponibilidad de la materia prima, caracterización fisicoquímica de los residuos, condiciones socioeconómicas y ambientales.

### **Definición del problema**

En el departamento del Guaviare el fruto del açai (*Euterpe precatoria*) representa una importante oportunidad económica para un promedio de 234 asociados a la planta de procesamiento Asoprepegua, de los cuales, 23 son mujeres cabezas de hogar, 37 son familias desplazadas y 175 familias campesinas (*Ambiente, vision Amazonia , 2020*), promovido por su alto valor nutricional y su potencial en mercados nacionales e internacionales.

Sin embargo, en el departamento del Guaviare se generan aproximadamente 400 toneladas de *Euterpe precatoria* al año, de los cuales no se realiza un correcto aprovechamiento de residuos (*Ambiente, vision Amazonia , 2020*); además, en el proceso se generan los residuos de semillas y cáscara, los cuales corresponden al 85% del peso de la fruta y representa 1746 toneladas métricas acumuladas en la región amazónica (*Monteiro, Miguez, Silva, & Silva, 2019*).

La región del Guaviare, caracterizada por su creciente producción de açai, enfrenta un manejo insuficiente de los residuos orgánicos generados (pulpa, cáscaras y semillas), los cuales son desechados sin un tratamiento adecuado y contribuyen a la generación de gases efecto invernadero (*Repsol, 2023*); por otro lado, los problemas ecológicos y de sostenibilidad puede generar la erosión de los suelos, alteración del hábitat afectando la sostenibilidad del ecosistema amazónico donde se cultiva (*Castro, Barrera, Carrillo, & Hernandez, 2015*).

Frente a esta problemática se propone realizar el análisis sobre la digestión anaeróbica como una alternativa viable para el aprovechamiento de los residuos mencionados y sobre los impactos ambientales que conlleva usando el método análisis de ciclo de vida (ACV). Esto se resume en la pregunta ¿Cuáles son los impactos ambientales asociados a la producción de biogás a partir de los residuos de açai (*Euterpe precatoria*) en el departamento del Guaviare analizados mediante la aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV)?.

### **Justificación**

La universidad EAN actualmente se encuentra desarrollando este proyecto “Validación e implementación de sistemas mixtos de generación de energías renovables para el desarrollo de MiPymes rurales”, con el objetivo de obtener fuentes de energía renovables y que fortalezcan la productividad rural y promuevan la bioeconomía a partir del aprovechamiento de biomasa residual, especialmente de productos agroindustriales como el açai y el coco.

El presente trabajo contribuye a este proyecto al desarrollar el ACV para el aprovechamiento del açai (*Euterpe precatoria*) en la zona del Guaviare, que es una de las zonas objetivo que se plantean.

Así, la investigación no se restringe únicamente al análisis académico; también tiene como objetivo contribuir con soluciones prácticas que puedan implementarse en las áreas rurales. El uso de los residuos de açai para producir biogás es una opción que combina ventajas ecológicas, ya que disminuye la eliminación inapropiada de los residuos y desechos; beneficios económicos, porque crea nuevas fuentes de energía y oportunidades para la producción; y beneficios sociales, pues aumenta la autonomía energética de las comunidades.

La producción de biogás a partir de los residuos orgánicos del açai, representa una oportunidad para transformar esta biomasa residual en energía renovable. En Colombia, estudios señalan que el biogás generado por digestión anaerobia tiene un alto contenido de metano que varía entre el 50% y 70%, por lo cual se considera apto para la generación eléctrica o para el uso térmico a nivel doméstico e industrial (*LED LAC, 2021*).

Si se habla del açai, aunque no hay mucha documentación con respecto a la información específica sobre el volumen exacto de residuos, en el Guaviare sí se ha conocido que la producción creciente de esta fruta genera residuos significativos generando 90% de la fruta como residuo según lo comentado en la entrevista realizada al señor Edgar Montenegro

CEO de la empresa AMAPURI, especialmente de la cáscara, susceptibles de convertirse en biomasa, que al someterse a digestión anaerobia, pueden producir un volumen considerable de biogás (siendo el metano alrededor del 60%) que se utiliza para la generación de energía y la reducción de emisiones contaminantes; aún así se estima que el potencial teórico en la producción de biogás en sectores agroindustriales en Colombia es muy alto, llegando a alcanzar un 25% de la demanda de gas natural del país, evidenciando preliminarmente la viabilidad ambiental y energética para implementar proyectos basados en residuos orgánicos locales, incluyendo los del açai en regiones como Guaviare (*LED LAC, 2021 & Orozco et al. 2016*).

Existen muchos beneficios ambientales del sistema de generación propuesto tales como el de la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), ya que el biogás se genera mediante la digestión anaerobia de residuos orgánicos, capturando metano que al final sería liberado a la atmósfera. El metano en sí, es un gas con un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el  $CO_2$  que al ser capturado y aprovechado como energía renovable se puede evitar su liberación directa, reduciendo significativamente las emisiones de GEI. Además, sustituye combustibles fósiles, evitando emisiones adicionales de  $CO_2$ ; siendo que, hoy en día, la industria del biogás puede reducir las emisiones globales de GEI entre un 10% y 13%, con ahorros de hasta un 240% en comparación con los combustibles fósiles tradicionales ya conocidos (*Miogas 2024, Garrido, 2024 & UAESP, 2025*).

No menos importante es la mitigación del cambio climático, que gracias a proyectos como el de la planta de tratamiento de residuos en Doña Juana han contribuido a evitar la emisión de alrededor de 800,000 toneladas de  $CO_2$  al año, generando Certificados de Reducción de Emisiones (CRE) y promoviendo la financiación de programas sociales que benefician a comunidades locales. Asimismo, la mejora ambiental en el suelo y el agua se logra mediante el proceso de producción de biogás, el cual genera digestato como

subproducto, reduciendo así la necesidad de fertilizantes químicos y favoreciendo las prácticas agrícolas sostenibles. Este biofertilizante mejora la salud del suelo y la captura de carbono, cerrando el ciclo de nutrientes y contribuyendo a la regeneración de los ecosistemas amazónicos (UAESP, 2025, *BiogasIndustrial*, s.f., Garrido, 2024 & Miogas, 2024).

De acuerdo a lo anterior, el proyecto representa una solución integral frente a los desafíos ambientales, sociales y económicos que afronta la región, y responde a la necesidad global de transitar hacia modelos de desarrollo más sostenibles; ya que actualmente los modelos tradicionales basados en el uso intensivo de combustibles fósiles han generado impactos severos como el cambio climático, la degradación de ecosistemas, la pérdida de biodiversidad, la contaminación de suelos y cuerpos de agua, y el aumento de las desigualdades sociales (Barba et al., 2024).

Por lo tanto, la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en esta iniciativa permitirá evaluar de manera integral los impactos ambientales, sociales y económicos asociados a toda la cadena productiva, desde la recolección de los residuos hasta el aprovechamiento energético y la gestión de subproductos; fundamental para identificar oportunidades de mejora, validar la viabilidad del proyecto y proporcionar información sólida para la formulación de políticas públicas y la promoción de tecnologías limpias en la región (Castro et al., 2023).

### **Análisis de requerimientos**

La generación constante de residuos orgánicos provenientes del açáí en la zona del Guaviare genera subproductos desechados de manera inadecuada; para ello se presenta una alternativa usando estos subproductos para la producción de biogás y proporcionar un correcto aprovechamiento a los desechos. Para realizar esto el proyecto se centra en realizar el análisis de ciclo de vida (ACV) de la generación de biogás a partir de residuos de açáí, este análisis permitirá identificar el alcance y oportunidades de mejora ambiental en la zona del Guaviare.

El açáí es un fruto que no se cultiva en todas las épocas del año, en las zonas amazónicas inundables o bajíos maduran entre los meses de enero y marzo; y en bosques de altura maduran entre los meses de mayo y octubre (*issuu, 2021*), esto genera una dificultad para obtener los frutos entre los meses de marzo a mayo. En el lapso en el cual no se tiene cosecha de açáí se requiere de otro residuo orgánico capaz de sustituirlo para mantener las bacterias anaeróbicas productoras de biogás. Pasado el mes de mayo se puede utilizar otros residuos como sustituto para seguir abasteciendo el biodigestor, algunas de las opciones más convenientes son los residuos orgánicos de la yuca, el plátano y la piña con una producción de 12.830 t/año, 43.365 t/año y 3.762 t/año respectivamente en el año 2022 en el departamento del Guaviare (*upra, 2022*), estas 3 opciones son las más convenientes ya que tienen las cantidades más altas de producción en el departamento y son producidos a lo largo de las diferentes épocas del año; sin embargo, otra opción viable es el estiércol, que es el residuo más común encontrado en las zonas amazónicas.

El aporte de la comunidad será clave para el avance del proyecto. El açáí es una importante oportunidad económica para un promedio de 234 asociados a la planta de procesamiento Asoprepegua, de los cuales, 23 son mujeres cabezas de hogar, 37 son familias desplazadas y 175 familias campesinas (*Ambiente, vision Amazonia , 2020*) en el

departamento del Guaviare; se involucra a la población campesina proveniente del departamento brindándoles capacitación para enseñar el correcto uso que deben tener los residuos orgánicos del biogás generado como alternativa energética para sus hogares y pequeñas agroindustrias. Se requiere esta inclusión comunitaria para generar mayor apropiación cultural del proyecto y garantizar su permanencia y obtención de beneficios sociales hacia la comunidad como la disminución de costos de energía y la diversificación de ingresos.

Para garantizar el proceso se realiza una estimación respecto a los parámetros necesarios y, se utiliza la herramienta de SimaPro, basada en bases de datos confiables, lo cual, permite una estimación precisa respecto a los impactos ambientales y una proyección a escala industrial, además se requiere adquirir los permisos necesarios para el uso del sistema. Para generar los datos a ingresar en la herramienta se requieren los respectivos balances de masa y energía guiado a nivel industrial, para esto se requieren resultados generados a nivel de laboratorio y después llevarlos a nivel industrial; además de un inventario para realizar un análisis para un biodigestor llevado al entorno industrial y así obtener resultados de este nivel.

## Marco teórico

### ¿Qué es el açai?

El açai, azai, palmito o manaca es una palmera del norte de América del Sur, la cual crece formando asociaciones en bosques húmedos cerca de las riberas, se considera un "superalimento" debido a sus propiedades antioxidantes y nutricionales, dado su alto contenido de compuestos fenólicos, vitaminas, aceites esenciales, minerales, entre muchos otros. El fruto consiste en una baya redondeada pequeña que se torna color violeta a la madurez y que contiene una sola semilla de gran tamaño rodeada por una fina capa fibrosa (la pulpa), similar al arándano y que es de interés por sus propiedades y beneficios a la salud (Graziati, 2023) en la Figura 1 se puede observar cómo crece el açai.

### Figura 1

*Imagen ilustrativa del açai en la amazonia*



Nota: tomado de “Descubre el nutritivo açai : El tesoro amazónico – Mayoreo online” por Mayoreo online, 2010.

([https://cdn.shopify.com/s/files/1/0012/3512/4273/files/Acai\\_Palmera.jpg?v=1595442379](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0012/3512/4273/files/Acai_Palmera.jpg?v=1595442379) )

### *Açai en el Guaviare*

El açai es reconocido mundialmente por su alto contenido en antioxidantes, polifenoles y antocianinas, que aportan numerosos beneficios para la salud humana. Colombia posee un vasto recurso forestal con más de 6 millones de hectáreas aptas para la producción sostenible de açai en la Amazonía, con el Guaviare siendo una de las regiones

para el desarrollo de cultivos y cadenas productivas que integran conservación y bioeconomía; considerando empresas como Amapurí en el Putumayo, las cuales están impulsando una bioeconomía regional mediante la producción sostenible de açái, con la generación de empleo y sustitución de cultivos ilícitos por rentas legales, promoviendo la protección forestal y la regeneración natural del ecosistema (*La nota economica, 2025, Comunicaciones ProColombia, 2025, Comunicaciones, 2021 & SINCHI, 2018*).

### ***Proceso productivo del açái***

El proceso general del açái (*Euterpe precatoria*) abarca desde la recolección de los frutos maduros, identificados por la señal de abscisión y el color óptimo, hasta su preparación para la distribución en el mercado. Tras la cosecha, los racimos se transportan a plantas de procesamiento locales donde se realiza una selección rigurosa para descartar frutos dañados. Luego, se extrae la pulpa mediante métodos manuales o mecánicos que separan eficazmente la pulpa del hueso. Esta pulpa es sometida a procesos de conservación, generalmente congelación, que permiten mantener sus propiedades nutricionales y bioactivas, como antioxidantes, antocianinas y polifenoles (*Peña, 2012; Instituto SINCHI, 2018*) tal y como lo muestra la Figura 2

### **Figura 2**

#### ***Proceso del açái***



Nota: tomado de “Proceso de asa” por Dreamstime, 2025. (<https://es.dreamstime.com/stock-de-ilustraci%C3%B3n-proceso-del-acai-fruta-brasile%C3%B1a-image62121524>).

El proceso de forma específica en cada una de sus etapas se define de la siguiente manera:

- **Cosecha:** Se recolectan los frutos maduros de la palma açáí (*Euterpe precatoria*), identificando el inicio de la abscisión (cuando los frutos empiezan a desprenderse) y el color externo para determinar la madurez óptima (*Peña R., 2012 & SINCHI, 2018*).
- **Transporte y selección:** Los racimos de açáí se llevan a una planta de procesamiento local (como la de la Asociación de Productores por el Cambio Económico del Guaviare, ASOPROCEGUA). Además, se realiza una selección cuidadosa para eliminar frutos dañados o no aptos para la producción (*Peña R., 2012 & SINCHI, 2018*).
- **Desgranado y extracción de pulpa:** Se separan los frutos de los racimos, la pulpa se extrae manualmente o con maquinaria adecuada, generalmente mediante un proceso de maceración y lavado para separar la pulpa del hueso (*Peña R., 2012 & SINCHI, 2018*).
- **Procesamiento y conservación:** La pulpa extraída se procesa para conservar su calidad, manteniendo las propiedades bioactivas, se puede congelar para su conservación, manejo y distribución, con el fin de conservar antioxidantes y elementos funcionales como antocianinas y polifenoles (*Peña R., 2012 & SINCHI, 2018*).
- **Empacado y distribución:** La pulpa congelada se empaca en condiciones que garantizan su integridad durante el transporte y se distribuye tanto en mercados locales como nacionales, y empieza a incursionar en el mercado internacional. (*Peña R., 2012 & SINCHI, 2018*).

### ***Residuos del açai***

La producción del açai (*Euterpe precatoria*), genera residuos tales como la pulpa, cáscaras y semillas durante su cosecha y procesamiento. En el caso del Guaviare, la Asociación de Productores Agropecuarios por el Cambio Económico del Guaviare (ASOPROCEGUA) ha implementado plantas procesadoras con capacidad para tratar hasta 400 toneladas al año de pulpa de açai, ayudando a comunidades campesinas y fomentando un manejo sostenible del recurso (*Comunicaciones, 2021 & Visión Amazonia, 2020*).

### **Biodigestor**

Es un tanque sellado herméticamente con residuos orgánicos (animal o vegetal) como fuente de energía; los cuales contienen un grupo de microorganismos productores de una fermentación anaeróbica para obtener energía. Se genera un combustible conocido como biogás; el cual, puede ser utilizado entre 15 y 40 días después de su generación (*Argentina.gob.ar, 2025*). Corresponde a una mezcla de gases con alto contenido de metano, usado comúnmente para sustituir los combustibles convencionales como el gas propano, la leña y la electricidad (*Argentina.gob.ar, 2025*).

Los biodigestores posibilitan la producción de biogás con un alto poder calorífico, disminuyen la emisión de gases de efecto invernadero al atenuar la emisión ambiental de metano (un gas que tiene una potencia hasta 25 veces mayor que el CO<sub>2</sub>), optimizan las condiciones sanitarias al regular los vectores y los olores desagradables, y permiten obtener subproductos valiosos como biofertilizantes (efluente y lodo) (*Argentina.gob.ar, 2025*).

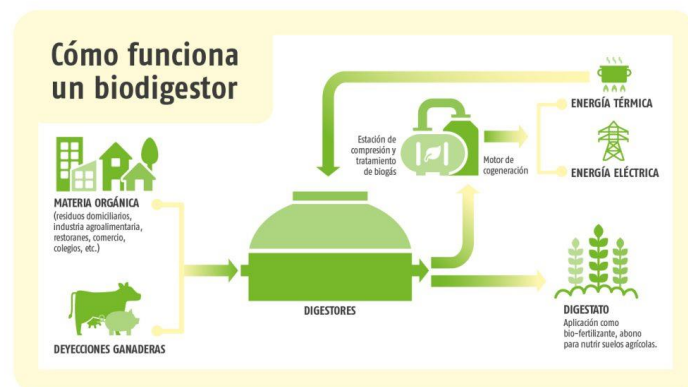
Constituye a una alternativa económica y amigable con el medio ambiente para implementar con mayor eficiencia en las comunidades rurales; ya que, permite mantener en mejor estado el medio ambiente, evitando en mayor cantidad los efectos de la contaminación, permitiendo aportar sobre la demanda energética en estas poblaciones y dándole un manejo

adecuado a los residuos orgánicos provenientes de los alimentos y de la fauna/flora, además de contribuir en la mitigación del calentamiento global (AQUAE FUNDACION, 2021).

En la figura 4 se muestran las diferentes etapas que se realizan en el proceso de un biodigestor, y sus productos y residuos.

### Figura 3

#### Funcionamiento de un biodigestor



Nota: Tomado de "Cómo funciona un biodigestor" por Pedro Pablo Robledo, 2025.

[\(https://www.paiscircular.cl/economia-circular/el-panorama-de-los-biodigestores-en-chile-una-alternativa-para-la-gestion-de-los-residuos-organicos/\)](https://www.paiscircular.cl/economia-circular/el-panorama-de-los-biodigestores-en-chile-una-alternativa-para-la-gestion-de-los-residuos-organicos/)

#### Digestato

Se le conoce como digestato al material residual rico en nutrientes obtenido conjuntamente con el biogás al finalizar la digestión anaerobia, en la que los microorganismos descomponen la materia orgánica en varias etapas (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis); el cual puede presentarse en forma líquida o sólida. A su vez contiene compuestos minerales tales como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y micronutrientes, también conserva una parte de la materia orgánica inicial, lo que hace que tenga propiedades mejorantes del suelo (Fuster, 2025).

### **Biogás**

Corresponde a un tipo de gas generado por medio de la digestión de residuos orgánicos en las industrias alimentaria, agrícola o ganadera, usado comúnmente como sustitución de combustibles como el gas propano, la leña y la electricidad (AQUAE FUNDACION, 2021). Se genera por medio de la digestión anaeróbica de dichos residuos y está formado por metano ( $CH_4$ ) el cual corresponde entre el 50% y el 75%, dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y proporciones de otros gases como el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), hidrógeno ( $H_2$ ) y amoníaco ( $NH_3$ ) (Argentina.gob.ar, 2025).

Utilizando los residuos orgánicos como materia prima para generar este gas corresponde a un nutriente para otros seres vivos; estos desechos, al igual que los lodos de las estaciones depuradoras de aguas residuales son útiles para generar biogás y darle un mejor uso (repsol, 2025).

### **Etapas de la biodigestión**

El proceso de generación de biogás corresponde de 4 etapas, a lo largo del proceso se involucran diferentes microorganismos con la capacidad de descomponer los residuos orgánicos y con ello liberando los gases como el metano (repsol, 2025). Las etapas correspondientes son:

- **Hidrólisis:** Corresponde al proceso mediante el cual se genera la ruptura de los polímeros para liberar las moléculas como los sacáridos y mejorar la eficiencia de la digestión anaeróbica; en la mayoría de los casos se utiliza altas temperaturas y descompresión rápida correspondiente a la hidrólisis química o enzimas correspondiente a la hidrólisis biológica y así romper la lignina con alguno de los tipos de hidrólisis. (Hale, 2021).

- **Acidogénesis:** Los compuestos resultantes de la etapa anterior son degradados por bacterias ácido génicas para producir alcoholes, aldehídos y ácidos grasos volátiles eliminando las trazas de oxígeno del proceso (*ScienceDirect, 2022*).
- **Acetogénesis:** Las bacterias acetogénicas convierten los productos de la etapa anterior en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono (*Editorial universidad Santiago de Cali*).
- **Metanogénesis:** Corresponde la etapa final del proceso en la cual los metanógenos se encargan de convertir los compuestos resultantes de las anteriores etapas en metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en ausencia del oxígeno (*Ferrovial, 2025*).

### **Análisis de ciclo de vida (ACV)**

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica que cuantifica las cargas ambientales que genera un producto o servicio durante todas las etapas de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final. Estas cargas incluyen emisiones y uso de recursos, y pueden causar impactos negativos en áreas como el ecosistema, la salud humana y los recursos naturales.

En el contexto de los sistemas de biogás para la región amazónica, el ACV permite cuantificar la reducción de gases de efecto invernadero al comparar las emisiones netas del proceso de biogás con escenarios alternativos, como la disposición no controlada de residuos orgánicos o el uso continuo de combustibles fósiles para generación de energía. Además, el ACV permite identificar y minimizar impactos ambientales negativos específicos del sistema, como emisiones fugitivas de metano durante la operación del biodigestor, acidificación del suelo o cuerpos de agua, y eutrofización derivada del manejo inadecuado de digestatos y efluentes, promoviendo buenas prácticas operativas que optimicen la sostenibilidad ambiental.

El ACV también considera beneficios socioeconómicos directos fundamentales para el desarrollo sostenible regional, como la seguridad energética en comunidades rurales aisladas de la Amazonía, la reducción de costos en combustibles y fertilizantes químicos, la generación de empleo local en la instalación y operación de biodigestores, y el fortalecimiento económico de las comunidades mediante la valorización de residuos. Igualmente, proporciona evidencia técnica robusta para diseñar políticas públicas enfocadas en energías renovables, desarrollar proyectos piloto escalables y formular estrategias de bioeconomía que impulsen una producción limpia y respetuosa con el ecosistema amazónico.

### ***Etapas del ACV***

Dada la complejidad sobre el análisis de ciclo de vida es necesario realizar el proceso por medio de 4 etapas.

- **Etapa 1 (Definición de objetivos y alcance):** Como primera etapa se debe **identificar los objetivos** del análisis y especificar los motivos por los cuales se realizará el análisis de ciclo de vida; además de identificar los límites a estudiar en el sistema (*Envira, 2024*).
- **Etapa 2 (Inventario del ciclo de vida):** Se identifica los impactos al medioambiente provocados por elementos del proyecto; además, se realiza el registro sobre las entradas (consumo de recursos, materias primas) y salidas (emisiones al aire, agua, energía, residuos, etc.) en las diferentes etapas del ciclo de vida. Después de obtener el registro se debe recopilar los datos y cuantificar los resultados (*The circular campus, 2023*); además de realizar el diagrama de flujo del proceso de producción y recolección del açai hasta la producción de biogás y los balances de masa y energía a lo largo del proceso.
- **Etapa 3 (Evaluación de impactos):** Se relaciona los resultados obtenidos en el inventario (entradas y salidas) con los impactos generados sobre el medio ambiente

con el objetivo de evaluar la importancia sobre los potenciales impactos generados y se clasifican los datos del inventario a cada categoría de impacto dependiendo su grado de afectación ambiental (*Eurofins, 2024*).

- **Etapa 4 (Interpretación de resultados):** Finalmente, después de identificar las principales cargas ambientales relacionadas al inventario se realiza una interpretación con los objetivos establecidos al inicio del proceso, identificando las áreas de mejora y las recomendaciones para la mejora del proceso (*Envira, 2024*).

#### ***Aplicaciones del ACV en la industria***

El análisis de ciclo de vida (ACV) tiene múltiples aplicaciones en la industria ya que, es un método para evaluar los impactos ambientales a lo largo de la vida útil de un producto o servicio (*Eurofins, 2024*). Algunos de sus campos de aplicación son:

- **Desarrollo y mejora de productos:** Las empresas utilizan el ACV en las primeras etapas del proceso para medir y analizar los impactos ambientales; los resultados de las aplicaciones en las primeras etapas ayudan a las empresas con una mejor producción y mejora del producto o servicio (*Camara de comercio de españa, 2023*).
- **Impacto ambiental:** Permite identificar los gases efecto invernadero, la huella de carbono generada, emisiones de carbono, uso del agua y consumo de energía a lo largo del proceso (*RIT Rochester institute of technology , 2020*).
- **Evaluación comparativa:** Facilita la comparación entre productos o servicios desde un punto de vista ambiental y así decidir por la opción con mayores factores sostenibles (*Geo innova, 2025*).

### **Análisis de restricciones**

El análisis de ciclo de vida se refiere a una herramienta enfocada en la identificación de los impactos ambientales; sin embargo, este también tiene ciertas limitaciones. Con el análisis de restricciones se permite identificar los límites técnicos, ambientales, económicos, legales y salud/seguridad, los cuales, se deben considerar para obtener los beneficios esperados y el cumplimiento de los objetivos.

- **Restricciones técnicas:** Al tratarse de un proceso dependiente de los residuos orgánicos del açáí (*Euterpe precatoria*) se analiza como principal limitación la disponibilidad estacionaria de este entre enero a marzo y en bosques de altura maduran entre los meses de mayo y octubre (*issuu, 2021*). En este lapso de tiempo no se tiene cosecha de açáí (*Euterpe precatoria*) en el departamento del Guaviare; por lo cual, no se obtiene los residuos. Se debe considerar el uso de otro residuo orgánico como la yuca, el plátano y la piña para mantener la estabilidad del sistema de digestión anaeróbica (*upra, 2022*).
- **Restricciones ambientales:** El proyecto se ubica en un ecosistema amazónico altamente sensible a cambios de clima, suelo y tierra; lo cual implica la necesidad de prevenir los efectos generados en los humedales y bosques considerando su ubicación entre el Orinoco y la Amazonía (*Saker & Prieto, 2020*). La zonificación ambiental regional definida por las autoridades ambientales, a su vez establece limitaciones para el uso del suelo en zonas estratégicas de reservas forestales y áreas protegidas, restringiendo acciones que puedan afectar zonas ecológicas o degradar la biodiversidad en la Amazonía (*Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2023*). Además, el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) delimita y regula el uso del suelo y las áreas de conservación en el nivel municipal, integrando lineamientos que buscan

compatibilizar el desarrollo territorial con la protección ambiental (*Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2023*).

- **Restricciones económicas:** Al utilizar software especializados para realizar el análisis de ciclo de vida (ACV), generalmente estos requieren de una membresía o licencia para poder obtener sus beneficios de uso. En este caso específico, el software SimaPro requiere de membresías que pueden variar entre los 2000 € y los 7800 € (*SimaPro, 2025*) dependiendo del uso que se le dé a la plataforma. Sin embargo, esta restricción no representa un impedimento para el presente proyecto, ya que la universidad dispone de licencias institucionales para SimaPro que fueron utilizadas en calidad de estudiantes, garantizando así el acceso completo a las funcionalidades del software sin costos adicionales.
- **Restricciones legales:** Para realizar el análisis de ciclo de vida (ACV) se debe regir bajo las normativas nacional e internacional (ISO):
  - ✓ **Ley 99 de 1993:** Establece los principios de gestión y conservación ambiental y los recursos naturales renovables, el cual incluye el respeto por la biodiversidad, la prioridad del consumo humano en el uso de recursos hídricos, la prevención de daños graves e irreversibles mediante el principio de precaución, y el fomento del uso de instrumentos económicos para la restauración ambiental, donde a su vez regula la participación ciudadana en temas ambientales y el manejo integral de residuos y autorizaciones ambientales. (*Ministerio de ambiente, s.f.*)
  - ✓ **Decreto 1076 de 2015:** Regula licencias ambientales y uso de recursos, entre estos la estructura del sector ambiental y desarrollo sostenible, la biodiversidad, la gestión del agua (tanto marítima como no marítima), vertimientos, la calidad del aire, emisiones contaminantes, residuos peligrosos (RESPEL), las licencias ambientales, el régimen

sancionatorio ambiental y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) (*Sector ambiente y desarrollo, 2015*).

- ✓ **Resolución 909 de 2008:** Establece los estándares de control de emisiones admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas, que define los límites máximos permisibles para diversos contaminantes atmosféricos, incluyendo material particulado menor a 2.5 micrómetros (PM 2.5), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), plomo, cadmio, mercurio, compuestos orgánicos volátiles, dioxinas y furanos, y las características técnicas correspondientes que deben cumplir las chimeneas y ductos de descarga para minimizar el impacto ambiental (*MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2008*)
- ✓ **Ley 1715 de 2014:** Su objetivo principal es promover el desarrollo y la utilización de fuentes de energía renovables y sistemas de almacenamiento, además de fomentar el uso eficiente de la energía en el país, facilitando la incorporación de estas fuentes en el mercado eléctrico, las zonas no interconectadas, la prestación de servicios públicos domiciliarios y el alumbrado público, mejorando el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad en el abastecimiento energético (*Función pública, 2014*).
- ✓ **Planes de Ordenamiento Territorial (POT):** Delimitan el uso del suelo y áreas de conservación; se define como “*el conjunto de acciones político-administrativas y de planificación física concertadas, adelantadas por los municipios o distritos y áreas metropolitanas*” (*Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, 2023*).
- ✓ **Ley 2254 del 2017:** Esta resolución, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, adopta la norma de calidad del aire en Colombia y establece disposiciones para la prevención y control de la contaminación atmosférica. Además, regula los niveles máximos permitidos de contaminantes en cuanto al material

particulado (PM10 y PM2.5), óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, entre otros, promoviendo así la formación ciudadana sobre la importancia del aire limpio (*Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017*).

- ✓ **ISO 14040 y 14044:** Establecen principios, requisitos, fases y marco de evaluaciones del ACV, con el fin de evaluar su impacto ambiental desde la obtención de materias primas hasta su disposición final (*dqs, 2025*).
- ✓ **ISO 14067:** Cuantificación de gases de efecto invernadero y huella de carbono asociadas con todas las etapas del ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final (*Online Browsing Platform (OBP), 2018*).
- ✓ **ISO 50001:** Su objetivo es ayudar a las organizaciones a usar la energía de manera más eficiente, reducir costos energéticos y minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, promoviendo así la sostenibilidad., proporciona una forma práctica para el uso de la energía a través del desarrollo de un sistema de energía (EnMS) (*Online Browsing Platform (OBP), s.f.*).
- **Restricciones de salud y seguridad:** El biogás de residuos de açáí presenta dos riesgos críticos: el metano (CH<sub>4</sub>), altamente inflamable con riesgo de explosión, y el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), gas tóxico que en concentraciones medias causa mareos y desorientación, y en concentraciones elevadas puede ser letal. La bioseguridad requiere un enfoque integral en tres niveles: técnico (sistemas de detección y monitoreo de gases, ventilación mecánica, señalización y zonificación de áreas peligrosas), organizativo (protocolos de trabajo seguros, capacitación continua, planes de emergencia y simulacros), y personal (uso obligatorio de equipos de protección individual como guantes, gafas, mascarillas respiratorias, ropa antiestática y calzado de seguridad). Este conjunto de medidas minimiza riesgos operativos y ambientales (*Biogas industrial, s.f. & Valladares F., s.f.*).

### **Metodología para la selección y desarrollo de la solución**

El proyecto adopta un enfoque mixto, ya que, se combina la interpretación del contexto como la recopilación y análisis de datos medibles asociados a la producción de biogás a partir de los residuos del açai (*Euterpe precatoria*) con referencias en estudios anteriores. Este enfoque permite no solo transformar la información y resultados obtenidos en datos numéricos para realizar comparaciones y modelar los impactos ambientales mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), sino también incluir datos cualitativos mediante entrevistas y recolección de información directa del señor Edgar Montenegro CEO fundador de Amapuri y Corpocampo ONG (Montenegro, s.f.)<sup>[OBJ]</sup>.

Por medio del componente cuantitativo basado en la implementación de los balances de masa y energía, bases de datos y software especializados como SimaPro se cuantifica los flujos de entrada y salidas del sistema, las variables durante el proceso del açai (*Euterpe precatoria*) se estima sus efectos ambientales.

Un enfoque mixto permite obtener un análisis contextual con la evaluación cuantitativa de resultados, lo que permite un análisis más completo y confiable sobre la viabilidad ambiental y social del aprovechamiento de los residuos de açai para la generación de biogás en el Guaviare y conseguir información directa de la población con conocimiento previo del fruto del de açai (*Euterpe precatoria*) y de la zona donde es cultivado y recolectado.

### **Alcance de la investigación**

La investigación se desarrolla por medio de un alcance descriptivo, ya que, el propósito principal es detallar y caracterizar los efectos sobre la producción de biogás con los residuos de açai (*Euterpe precariote*) en el departamento del Guaviare mediante la metodología del análisis del ciclo de vida (ACV). Este alcance permite identificar las

propiedades, características e impactos del sistema productivo hasta su transformación en biogás. Se buscar describir de forma metódica aspectos como:

- Disponibilidad de los residuos en la región en las diferentes épocas del año y manejo de los residuos.
- Los flujos de materia y energía asociados a la producción de biogás.
- Los impactos ambientales con base en las normas ISO 14040 y 14044.
- Las oportunidades de mejora de los impactos generados por la implementación de la digestión anaeróbica.

El propósito es documentar las condiciones actuales del sistema con datos precisos permitiendo evaluar su viabilidad y aprovechamiento energético.

### **Diseño de la investigación**

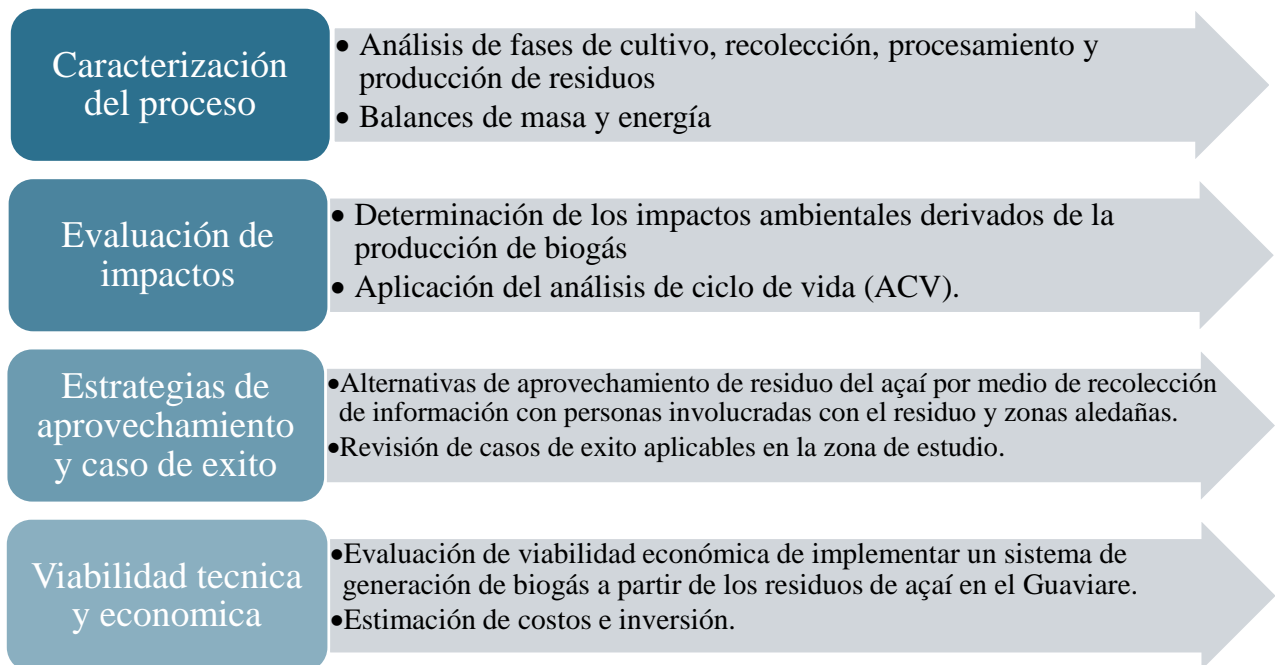
El proyecto se desarrolla bajo un diseño no experimental; ya que, no se manipulan las variables en la investigación de forma directa, lo ideal es analizar los procesos originales en la producción de biogás con los residuos de açáí en el departamento del Guaviare a través de la revisión de información disponible, el uso de bases de datos, la construcción de balances de masa y energía y la aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV). De esta manera, el estudio se centra en describir, evaluar y modelar los impactos ambientales asociados al proceso, sin intervenir directamente en la generación del biogás ni en sus condiciones operativa.

### **Etapas de la investigación**

La investigación se aborda por medio de 4 etapas que ejemplifican el proceso para desenvolver los objetivos estructurados y desarrollar el proyecto de investigación como se evidencia en la figura 5:

**Figura 4**

*Etapas en el desarrollo de la investigación*



Nota. Se muestra la caracterización, evaluación, estrategia y viabilidad técnica y económica sobre la producción de biogás a partir de los residuos de açáí (*Euterpe precatoria*) en el departamento del Guaviare. Fuente: Elaboración propia (2025).

### ***Etapas 1. Caracterización del proceso***

El propósito de esta primera etapa es realizar un diagnóstico exhaustivo del proceso productivo del açáí en el departamento del Guaviare, para así determinar la cantidad de residuos generados y entender sus características y calidad como insumo para producir biogás. Se llevó a cabo un análisis de documentos con información oficial proporcionada por la población relacionada a la producción del de açáí (*Euterpe precatoria*); además, complemento con la información suministrada por la postdoctorada Ana Katherine Díaz Durán de la Universidad Ean, quien se encuentra apoyando el proyecto en el cual está basada la investigación directamente en Guaviare y ha realizado las visitas de campo. Estas acciones generaran la creación de un diagrama de las etapas de cultivo, cosecha, transporte y

transformación, etc; además de establecer los flujos de materia desde el fruto hasta la pulpa y los desechos. Además, se realizó el estudio de la maquinaria implementada en el proceso para obtener la energía requerida en cada estación del proceso. Los balances de energía y masa del proceso se desarrollaron a partir de estos resultados, ya que serán un insumo técnico esencial para las etapas posteriores.

### ***Etapas 2. Evaluación de impactos***

Después de obtener los balances de masa y energía hallados en la primera etapa, se evalúan los impactos ambientales relacionados al sistema de producción de biogás a partir de los residuos del açai, (*Euterpe precatoria*) utilizando la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) siguiendo las normas ISO 14040 y 14044.

En este paso se determinaron las fronteras del sistema, incluyendo procesos como el transporte, la recolección, el pretratamiento, la digestión anaerobia, la gestión del digestato y el uso de biogás. Para desarrollar el ACV se deben recurrir a bases de datos primarias que corresponde a los datos recolectados a la largo de la primera etapa y datos secundarios que se pueden encontrar directamente en el software especializado como SimaPro. Esto facilito un análisis de sensibilidad y escenarios alternativos, así como el cálculo de indicadores de impacto ambiental en diversas categorías como la acidificación, el cambio climático, la eutrofización y el consumo energético.

En esta fase se ofrece una perspectiva clara sobre los puntos críticos ambientales que es necesario abordar para optimizar la sostenibilidad y productividad del proceso.

### ***Etapas 3. Estrategias de aprovechamiento***

Como siguiente etapa se desarrollaron alternativas de aprovechamiento con el objetivo de comprender los usos aplicados a los residuos del açai. Para eso, se observaron casos de éxito en contextos parecidos y se analizaron los diferentes factores operacionales como la aplicación de pretratamientos químicos o físicos, la digestión anaeróbica con otros

desechos agroindustriales presentes en el área o consultar alternativas de métodos logísticos que optimicen la recolección del material. Además de evaluar su aceptación por la población locales; estas estrategias se priorizaron y compararon con base en criterios económicos, sociales, técnicos y ambientales en la zona.

Lo que se obtuvo de esta fase corresponde un conjunto de sugerencias fundamentadas y validadas que guíen la toma de decisiones acerca del uso óptimo de los desechos del açai.

En caso de encontrar como resultado que la generación de biogás no es una opción viable para el uso de los residuos orgánicos de açai, se le puede dar una viabilidad mediante su uso para bebidas aromáticas, jabones exfoliantes, cajas ecológicas, jarrones para decoración, entre otros, agregando valor a la cadena de producción de açai, dejando de ser un problema ambiental y contribuyendo a la circularidad y la sostenibilidad (Nascimento & Silva, 2025).

Las alternativas de valorización mencionadas pueden implementarse de manera complementaria al sistema de biogás, especialmente durante los períodos de menor disponibilidad de residuos (entre marzo y mayo), cuando la producción de açai disminuye significativamente y se requiere diversificar las estrategias de aprovechamiento para mantener la sostenibilidad del modelo de bioeconomía región” (Nascimento & Silva, 2025)

#### ***Etapa 4. Viabilidad económica***

Finalmente, se llevó a cabo una valoración de la viabilidad económica para establecer este tipo de procesos en el departamento del Guaviare utilizando como fuente los residuos del açai, (*Euterpe precatoria*). En este estudio, se tuvieron en cuenta los procesos a escala industrial para ser llevados directamente a labor de campo. Los biodigestores, además de los otros mecanismos utilizados en el proceso se deben dimensionan de acuerdo a la cantidad de desechos que son ingresados y los balances de energía y masa obtenidos en las fases previas. Para obtener la viabilidad económica se obtuvieron los costos de operación (OPEX) y de

inversión (CAPEX), además de otros indicadores como el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el tiempo para recuperar la inversión.

Se hace énfasis ante cambios en el precio del mercado y en la disponibilidad de materias primas; sin embargo, esta viabilidad se basó en los costos del año en curso. Para obtener los costos correspondientes a la maquinaria utilizada en cada parte del proceso se consulta como fuente principal ALIBABA, la cual corresponde a una plataforma de comercio eléctrico y cuenta con la descripción de todas las características de los diferentes productos (tamaño, volumen, temperatura de uso, energía, etc (Alibaba.com reads, 2024)<sup>[96]</sup>). Al ser una plataforma con la información completa permite escoger los modelos de maquinaria necesario al colocar todas las características; ya que, al momento de ser elegida cada maquinaria, se compara sus características y el entorno al cual será llevado para que sea compatible y obtener una estimación de costos precisa. Sin embargo, para obtener mayor seguridad respecto a la maquinaria que deberá ser utilizada se realizan cotizaciones con la empresa SISTEMA.bio como proveedor para obtener el valor sobre el biodigestor que será utilizado y la empresa AGROPITAL S.A.S para obtener los costos de la zanja para el biodigestor y para la tina del biol.

Igualmente, se toman en consideración las leyes regulatorias, los riesgos potenciales y las acciones de mitigación para asegurar la viabilidad del proyecto. Así, esta etapa final logra establecer con más exactitud la viabilidad de realizar la utilización energética de los desechos del açai en el departamento del Guaviare, proporcionando un insumo esencial para futuros proyectos de implementación.

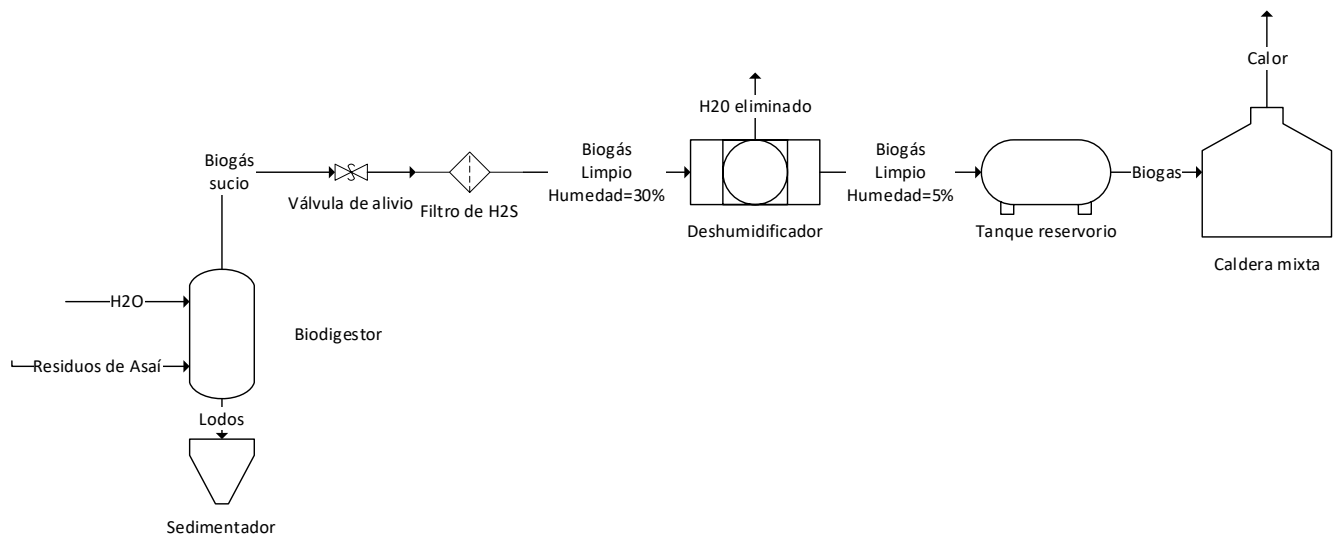
## Resultados

### Etapa 1. Caracterización del proceso

Para obtener el análisis de ciclo de vida (ACV) se debe iniciar planteando los balances de masa y energía, para esto se debe tener en cuenta el diagrama de proceso el cual se tendrá como una guía para determinar las entradas y salidas en cada parte del proceso utilizando la figura 6.

### Figura 5

Diagrama de proceso producción de Biogás

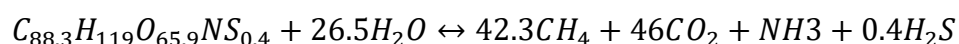


Nota. Se muestra el proceso de producción de Biogás con los residuos del açai (*Euterpe precatoria*) desde el ingreso al biodigestor hasta la obtención del producto del Biogás.

Fuente. Elaboración propia.

Para iniciar con el proceso matemático, primero se debe obtener el potencial energético sobre la generación del metano ( $CH_4$ ) a partir de la composición elemental de los residuos de açai presentada en la Tabla 1. El cálculo se basa en la ecuación de Buswell, que permite estimar teóricamente la cantidad de metano producido durante la digestión anaerobia.

### Ecuación de Buswell



**Tabla 1**

*Composición elemental de los residuos de açáí (base seca).*

<b>Elemento</b>	<b>% en base seca</b>	<b>Peso molecular</b>	<b>Moles</b>
Carbono (C)	45.4	12	3,78
Hidrogeno (H)	5.1	1	5,10
Oxigeno (O)	45.2	16	2,83
Nitrógeno (N)	0.6	14	0,04
Azufre (S)	0.5	32,06	0,02

Nota. Esta tabla presenta el porcentaje en base seca, el peso molecular y el mol es de los principales elementos que componen los residuos sólidos del açáí, incluyendo carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. Estos datos son la base para el cálculo estequiométrico de la digestión anaerobia, pues determinan la cantidad potencial de metano que puede generarse durante el proceso de biogás. Fuente: Tomado de documento Interlabco S.A.S por Agrosavia, 2025.

### **Cálculo estequiométrico para producción de metano**

Coeficiente metano  $x = 42.3$

Coeficiente agua  $y = 26.5$

### **Reacción balanceada**

Una vez balanceada la reacción de Buswell con los coeficientes estequiométricos calculados ( $x = 42.3$  moles de  $\text{CH}_4$  y  $y = 26.5$  moles de  $\text{H}_2\text{O}$ ), se procedió a determinar el potencial teórico de metano (PTM). Este cálculo se realizó considerando la masa molecular del residuo promedio (2258.67 g/mol) y la masa total de gases generados (2731.4 g), obteniendo una relación de 1.208 g de gas por gramo de residuo degradado. El PTM resultante fue de 16.46 MJ/kg, valor que representa la energía teóricamente aprovechable bajo condiciones ideales de digestión anaerobia. Para validar este resultado teórico, se comparó con mediciones experimentales realizadas en condiciones controladas de laboratorio realizadas por la doctora Ana Katherine Díaz Durán, donde se registró un potencial

experimental de 19.52 MJ/kg. La diferencia de 3.06 MJ/kg (aproximadamente 18.6% superior al valor teórico) indica que el modelo de Buswell es conservador y que las condiciones reales de digestión anaerobia mesofílica (35°C) en la región del Guaviare favorecen una mayor eficiencia de conversión energética. Estos resultados se resumen en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Potencial teórico y experimental de metano*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Potencial teórico de metano (PTM)	16,46	MJ/kg
Potencial experimental (medición)	19,52	MJ/kg
Diferencia porcentual experimental-teórica	3,06	MJ/kg

Nota. Esta tabla resume el potencial energético esperado (teórico) y el medido experimentalmente para los residuos de açai, expresados en mega julios por kilogramo (MJ/kg). La diferencia porcentual entre ambos valores proporciona una medida de la precisión del modelo teórico frente a condiciones reales, mostrando que hay una buena aproximación y que el residuo es apto para la generación efectiva de biogás. Fuente: Tomado de documento para análisis de ciclo de vida por Ana Katherine Diaz Duran, 2025.

### **Poder calorífico del biogás**

Poder calorífico teórico estimado del biogás = 21.6 MJ/kg

Poder calorífico superior del metano = 55 MJ/kg<sup>5</sup>.

### **Impacto del contenido de humedad**

La humedad debe ser inferior al 30% para maximizar eficiencia y poder calorífico.

A mayor humedad, se reduce el poder calorífico y la eficiencia del biogás.

✓ *Datos base:*

El biodigestor cuenta con un tamaño de 8 m<sup>3</sup> de los cuales 5 m<sup>3</sup> son del estiércol o los residuos y los 3 m<sup>3</sup> corresponde al gas como tal, para tener una relación realista se asume como base de cálculo una entrada de 1000 kg de residuos orgánicos de açai y 4000 kg de agua, lo cual equivale a los 5000 kg de estiércol en el biodigestor que es igual a 5 m<sup>3</sup>.

Datos de entrada:

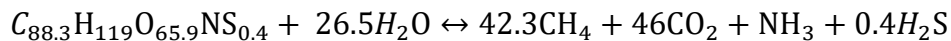
- Residuos orgánicos = 1000 kg (1 m<sup>3</sup>)
- Agua (H<sub>2</sub>O) = 4000 kg (4 m<sup>3</sup>)

Empezando con la primera operación

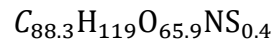
### Biodigestor:

- **Balance de masa**

Se tiene la ecuación de Buswell



Reemplazan los valores de las composiciones anteriores en la formula se obtiene el valor de la molécula promedio del residuo:



$$M_{residuo} = (88.3 \times 12) + (119 \times 1) + (65.9 \times 16) + (1 \times 14) + (0.4 \times 32.06) = 2258.67 \text{ g/mol}$$

Ahora se calcula la masa total de gases por 1 mol de residuo.

**Tabla 3**

*Cantidad total de gases por 1 mol de residuo.*

Componente	Moles	Masa molar (g/mol)	Masa (g)
CH <sub>4</sub>	42.3	16	676.8
CO <sub>2</sub>	46	44	2024
NH <sub>3</sub>	1	17	17
H <sub>2</sub> S	0.4	34	13.6
<b>Total, gases</b>	—	—	<b>2731.4 g</b>

Nota. Se muestra las composiciones de los componentes del biogás para hallar el valor total de gases por 1 mol. Fuente: Elaboración propia.

Ahora con ambos valores se determina la masa de gas generada por la masa de residuo:

$$\frac{M_{gas}}{M_{residuo}} = \frac{2731.4 \text{ g}}{2258.67 \text{ g}} = 1.208 \frac{g_{gas}}{g_{residuo}}$$

Cada gramo de residuo orgánico que se degrada genera teóricamente 1.208 g de gas, teniendo en cuenta que entran 1000 kg de base como alimentación se obtuvo que la cantidad de biogás generado en el biodigestor es de **1208 kg**.

Finalmente, para hallar la cantidad de lodos obtenidos en la salida inferior del biogás se hace un balance sobre las entradas totales y la salida de gas para hallar la diferencia que corresponde al digestato o los lodos:

$$\text{Digestato (lodos)} = \text{Entrada} - \text{Salida}$$

$$\text{Digestato (lodos)} = (1000 \text{ kg}_{residuo \text{ açai}} + 4000 \text{ kg}_{H_2O}) - 1208 \text{ kg}_{biogas}$$

$$\text{Digestato (lodos)} = 3792 \text{ kg}_{lodos}$$

Se obtuvo que la cantidad de digestato (lodos) obtenidos en la salida inferior del biodigestor corresponde a **3792 kg**.

### Filtro de $H_2S$

- **Balance de masa:**

Se asume que el filtro elimina el 100% del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ).

Para obtener la cantidad de biogás  $H_2S$  que se obtiene en la salida del filtro de la cantidad de sulfuro de hidrógeno eliminado se necesita obtener las fracciones molares y másicas de la composición del biogás:

$$\text{Fracción masica (\%)} = \frac{\text{masa componente}}{\text{masa total de gases}} \times 100$$

Durante la operación del biodigestor se dio como resultado que la masa total de gases para 1 mol de residuo es de **2731.4 g**; se debe realizar la operación con cada uno de los componentes y así obtener las fracciones másicas.

**Tabla 4**

*Fracción másica (%) componentes del biogás en 1 mol.*

Componente	Masa (g)	Fracción másica (%)
CH <sub>4</sub>	676.8	24.77
CO <sub>2</sub>	2024	74.10
NH <sub>3</sub>	17	0.622
H <sub>2</sub> S	13.6	0.49
<b>Total, gases</b>	<b>2731.4 g</b>	<b>100</b>

Nota. Se utiliza la operación para hallar la fracción másica (%) de cada uno de los componentes del biogás con el valor total de gases generado con 1 mol de residuo y después escalar los valores respecto a la cantidad de biogás generado en el biodigestor. Fuente: Elaboración propia.

Los valores hallados son para 1 mol, ahora se necesita encontrar los valores para la cantidad de moles de entrada y así obtener la fracción másica y la cantidad total de cada componente para la cantidad real que está ingresando al filtro (**1208 kg**).

Primero se debe saber cuántas moles hay en la cantidad real que ingresa:

$$\frac{\text{masa real (g)}}{\text{masa 1 mol (g)}} = \frac{1208000g}{2731,4 g} = 442.26$$

Ahora se obtienen los moles reales que están ingresando, esto se obtiene multiplicando los moles de cada componente considerante 1 mol de base por la cantidad real de moles que ingresa usando la formula=

$$n_{\text{componente real}} = n_{1 \text{ mol base}} \times n_{\text{real entrada}}$$

Ahora con lo moles reales de cada componente se halla la masa real de entrada por componente usando la formula=

$$m_{componente\ real} = n_{componente\ real} \times masa\ molar$$

Por último, hallamos las fracciones másicas reales usando la formula=

$$Fracción\ masica\ (\%) = \frac{masa\ componente}{masa\ total\ de\ gases} \times 100$$

**Tabla 5**

*Moles reales, fracción másica (%), masa (kg) reales por la cantidad de entrada*

Componente	Moles reales	Masa real (kg)	Fracción másica real (%)
<i>CH<sub>4</sub></i>	18707.6	299.3	24.77
<i>CO<sub>2</sub></i>	20343.9	895.13	74.1
<i>NH<sub>3</sub></i>	442.26	7.5	0.6
<i>H<sub>2</sub>S</i>	176.9	6.01	0.5
<b>Total</b>	<b>39670.66</b>	<b>1207.94≈1208</b>	<b>100</b>

Nota. Se agrupan los resultados correspondientes a las cantidades reales de moles, fracciones másicas y masas de cada uno de los componentes en la cantidad real que ingresa de biogás (1208 kg). Fuente: Elaboración propia.

Finalmente teniendo las composiciones reales en la cantidad de biogás sucio que entra al filtro se puede obtener la cantidad de biogás limpio que sale y la cantidad de sulfuro de hidrógeno (*H<sub>2</sub>S*) eliminado en el filtro.

$$m_{entrada} = m_{biogas\ limpio} + m_{H_2S\ eliminado}$$

$$1208\ kg = m_{biogas\ limpio} + 6.01\ kg$$

$$m_{biogas\ limpio} = 1202\ kg$$

Se obtiene que la cantidad de biogás que sale limpio del filtro es de **1202 kg** y la cantidad de sulfuro de hidrógeno (*H<sub>2</sub>S*) eliminado en el filtro es de **6.01 kg**.

### Deshumidificador

- **Balance de masa:**

Se tiene una entrada al deshumidificador de 1202 kg de biogás con 30% de humedad, este debe salir con 5% de humedad; asumiendo que el valor que se obtiene viene con el 30% de humedad.

Primero se debe saber cuál es la cantidad de humedad retenida en la masa de biogás que ingresa al deshumidificador:

$$m_{biogas\ total} = 1202\ kg$$

$$m_{H_2O\ biogas} = 0,30 \times 1202\ kg$$

$$m_{H_2O\ biogas} = 360.6\ kg$$

Y la cantidad restante corresponde al biogás seco:

$$m_{biogas\ seco} = 1202\ kg - 360.6\ kg = 841.4\ kg$$

Se define que la salida de la corriente sea de 5% de humedad=

- $m_g = masa\ de\ biogas\ seco$
- $m_{H_2O\ salida} = masa\ de\ agua\ en\ el\ biogas\ a\ la\ salida$

$$\frac{m_{H_2O\ salida}}{m_g + m_{H_2O\ salida}} = 0.05$$

Se realiza el despeje para hallar la masa de agua de salida=

$$m_{H_2O\ salida} = \frac{0.05}{0.95} \times 841.4\ kg = 44.28\ kg$$

$$m_{H_2O\ eliminado} = 360.4\ kg - 44.28\ kg = 316.12\ kg$$

$$m_g\ húmedo = 841.4\ kg + 44.28\ kg = 886\ kg$$

La cantidad de humedad en el biogás a la salida del deshumidificador es de **44.28 kg**, la cantidad de humedad (H<sub>2</sub>O) eliminado de la masa de biogás es de **316.12 kg** y la cantidad de biogás a la salida del deshumidificador con 5% de humedad es de **886 kg**.

**Tanque reservorio**

El tanque tiene como objetivo almacenar el gas, manteniendo una presión y flujo constante para entregarlo a la caldera, sin embargo, en este caso, se asume que durante este lapso se tendrá unas pérdidas del 2% del gas.

$$M_{entrada} = 886 \text{ kg}$$

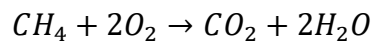
$$Pérdidas \ 2\% = 17.7 \text{ kg}$$

$$M_{salida} = 886 \text{ kg} - 17.7 \text{ kg} = 868.3 \text{ kg}$$

### Caldera mixta

- **Balance de masa:**

En este caso, la reacción química que describe la combustión del metano es:



Para realizar un cálculo estequiométrico se determinan los moles de metano con la masa utilizada es de 299.3 kg y considerando que la masa molar del metano (CH<sub>4</sub>) es 16 kg/kmol, tenemos:

$$n(CH_4) = 299.3 \text{ kg} / 16 \text{ kg/kmol} \approx 18.70 \text{ kmol}$$

El oxígeno necesario, en cantidad estequiométrica, es el doble de los moles de metano:

$$n(O_2) = 2 \times 18.70 = 37.4 \text{ kmol}$$

Calculando la masa de oxígeno:

$$Masa_{O_2} = 37.4 \text{ kmol} \times 32 \text{ kg/kmol} = 1,196.8 \text{ kg}$$

En la práctica, se emplea un exceso de aire para garantizar una combustión completa.

Si consideramos un 20% de exceso de aire:

$$O_2 \text{ REAL} = 1,196.8 \text{ kg} \times 1.20 = 1,436.16 \text{ kg}$$

Se sabe que el aire contiene aproximadamente un 21% de O<sub>2</sub> en masa, así que el aire necesario será:

$$Air e_{necesario} = 1,436.16 \text{ kg} / 0.21 \approx 6,838.85 \text{ kg}$$

Este aire contiene también nitrógeno, que representa aproximadamente el 79% del aire en masa:

$$O_2: 1,436.16 \text{ kg (21\%)}$$

$$N_2: 4,820.03 \text{ kg (79\%)}$$

Los productos de combustión del metano incluyen dióxido de carbono y agua. La cantidad de CO<sub>2</sub> producido, considerando que el mol de metano genera un mol de CO<sub>2</sub>, es:

$$n(CO_2) = 20343.9 \text{ kmol}$$

$$m_{CO_2 \text{ real}} = 20,343 \times 44 = 895131.6 \text{ g} = 895.13 \text{ kg}$$

La cantidad de agua producida es:

$$n(H_2O) = 2 \times 20,343 = 40,68 \text{ kmol}$$

$$Masa H_2O \approx 40,68 \text{ kmol} \times 18 \text{ kg/kmol} \approx 732.24 \text{ kg}$$

Finalmente, del exceso de oxígeno que no reacciona, la masa es:

$$Masa O_2 \text{ sin reaccionar} = 1,436.16 \text{ kg} - 1,196.8 \text{ kg} \approx 239.36 \text{ kg}$$

### **Biodigestor**

En el biodigestor se lleva a cabo la digestión anaerobia de los residuos de açai, donde los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando biogás (principalmente CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>) y digestato.

- **Balance de energía:**

El sistema necesita alcanzar 35°C, temperatura óptima para las bacterias mesofílicas que realizan la digestión.

$$Q_1 = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

- $\Delta T = 9.5 \text{ K}$  como en el cálculo de calor, no importa si se usa °C o K, porque hay una variación de 1 °C es igual a una variación de 1 K:

$$Q_1 = 5,000 \text{ kg} \times 4.18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \times 9.5 \text{ K} = 198.55 \text{ MJ}$$

Esta fórmula calcula la energía necesaria para calentar la mezcla inicial desde temperatura ambiente (25.5°C) hasta la temperatura de operación (35°C). Los **198.55 MJ** representan una inversión energética única al arrancar el biodigestor. Una vez alcanzada esta temperatura, el sistema debe mantenerla mediante el balance entre ganancias y pérdidas térmicas.

**Calor generado por la digestión anaerobia (reacción exergónica):**

$$Q_{reacción} = SV_{degradados} \cdot \Delta H_{reacción}$$

$$Q_{reacción} = 573.75 \text{ kg} \times 80 \text{ kJ/kg} = 45.9 \text{ MJ}$$

Las bacterias anaerobias degradan el 75% de los sólidos volátiles (eficiencia típica en clima tropical cálido), liberando **45.9 MJ/día** de calor metabólico. Esta es una fuente de calor endógena que ayuda a mantener la temperatura sin necesidad de calentamiento externo. El 25% no degradado permanece como digestato.

**Calor absorbido por la radiación solar directa:**

$$Q_{solar} = Radiación \times Área \times \alpha \times Horas$$

$$Q_{solar} = 4.5 \text{ kWh/m}^2 \times 12.06 \text{ m}^2 \times 0.85 \times (5/24) \text{ día} = 34.67 \text{ MJ/día}$$

La radiación solar es una fuente gratuita y significativa de calor (34.67 MJ/día). La geomembrana oscura absorbe el 85% de la radiación incidente. Esta ganancia térmica, combinada con el calor de reacción, reduce drásticamente o elimina la necesidad de calentamiento artificial, haciendo el sistema más sostenible y económico.

- Balance neto diario:

$$\text{Calor neto disponible} = 80.57 - 45.86 = 34.71 \text{ MJ/día}$$

¡El calor de reacción + calor solar son suficientes para mantener la temperatura! NO se requiere calentamiento externo después del arranque inicial. Solo se necesita calentar la carga inicial:  $Q_{inicial} = 198.55 \text{ MJ}$  (una sola vez al arrancar el biodigestor).

Energía residual:  $E_{digestato} = 2,928 \text{ MJ}$  (materia orgánica no degradada)

### Filtro de $H_2S$

Se espera eliminar el  $H_2S$  del biogás mediante lavado con agua alcalina, reduciendo concentración de 1,500 ppm a  $< 75 \text{ ppm}$

- Eficiencia de remoción de  $H_2S$  en clima tropical: 95% (lavado con agua alcalina ligera), con el poder calorífico de  $H_2S$  de 15.2 MJ/kg

$$H_2S_{removido} = 0.95 \times 6.01 \text{ kg} = 5.71 \text{ kg}$$

$$E_{H_2S} = M_{H_2S_{eliminado}} \times PCS_{H_2S}$$

$$E_{H_2S} = 5.71 \text{ kg} \times 15.2 \text{ MJ/kg} = 86.79 \text{ MJ}$$

Esta energía se pierde, pero es necesario por seguridad.

### Calor cedido por el biogás:

$$Q_{enfriamiento} = m_{biogás} \times C_{p_{biogás}} \times \Delta T$$

$$Q_{enfriamiento} = 1,202.29 \text{ kg} \times 2.2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \times (35 - 30) \text{ K} = 13.23 \text{ MJ}$$

Este calor es absorbido por el agua (se calienta ligeramente)

$$\text{Energía salida} = 16,445.04 - 182.24 = 16,262.8 \text{ MJ}$$

### Deshumidificador

Hay que considerar que el proceso tiene dos componentes de energía:

#### (A) Calor de enfriamiento del biogás:

$$Q_{enfriamiento} = m_{total} \times C_{p_{biogás}} \times \Delta T$$

- $\Delta T = 30^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C} = 15 \text{ K}$ , a este valor el punto de rocío permite que solo quede 5% de humedad.

$$Q_{enfriamiento} = 1,202kg \times 2.2kJ/kg \cdot K \times 15K = 39.67MJ$$

Esta es la energía que se debe extraer del biogás para bajar su temperatura.

**(B) Calor de condensación del vapor de agua:**

Cuando el vapor de agua se condensa (pasa de gas a líquido), libera calor latente:

$$Q_{condensación} = m_{agua\ condensada} \times \lambda_{vaporización}$$

$$Q_{condensación} = 316.12kg \times 2.442MJ/kg = 771.95MJ$$

Al igual que la anterior esta energía también se debe extraer porque el vapor la libera al condensarse, teniendo en cuenta que la energía es alta porque el cambio de fase agua-vapor requiere/libera mucha energía.

$$Q_{total\ remover} = Q_{enfriamiento} + Q_{condensación}$$

$$Q_{total\ remover} = 39.67MJ + 771.95MJ = 811.62 MJ$$

La energía disponible del biogás se ve como el CH<sub>4</sub> permanece intacto, pero el biogás está más frío:

$$Energíaquímica = 299.3kg CH_4 \times 55MJ/kg = 16,461.5MJ(\text{sin } c \text{ cambios})$$

Pero hay pérdida de energía térmica por enfriamiento:

$$\Delta E_{térmica} = 886kg \times 2.2kJ/(kg \cdot ^\circ C) \times (30 - 15)^\circ C = 29.24MJ$$

**Tanque reservatorio:**

$$Energíaperdida = 5.99kg \times 55MJ/kg = 329.45MJ$$

El biogás en el tanque se calienta lentamente hacia temperatura ambiente (26°C):

$$Q_{ganancia} = m \times Cp \times \Delta T$$

$$Q_{ganancia} = 868.28kg \times 2.2kJ/(kg \cdot ^\circ C) \times (26 - 15)^\circ C = 21MJ$$

La energía disponible se relaciona la energía química con la energía térmica ganada:

$$Energíaquímica = 293.31kg \times 55MJ/kg = 16,132.05MJ$$

$$Energíatotaldisponible = 16,132.05 MJ + 21 MJ = 16,153.05MJ$$

**Caldera mixta (combustión):**

Sirve con el fin de quemar el metano para generar calor útil (vapor o agua caliente).

$$Q_{combustión} = 293.31kg \times 50MJ/kg = 14,665.5MJ$$

Finalmente, la energía térmica útil:

$$Q_{útil} = 14,665.5 - 2,933.1 = 11,732.4MJ/día$$

$$Equivalente\ a: 11,732.4MJ/3.6 = 3,259kWh\ térmica\ cos/día$$

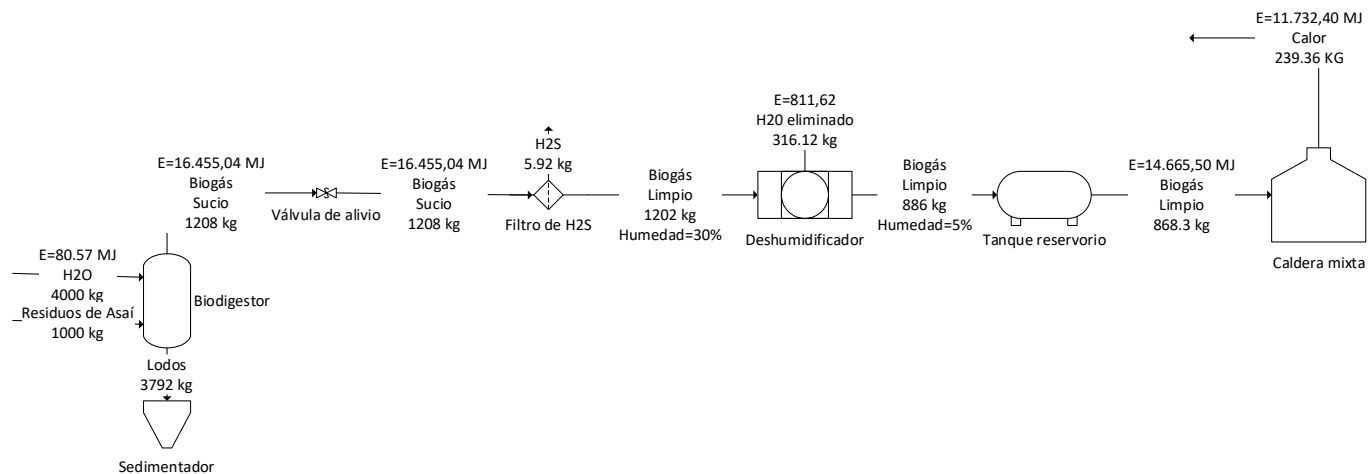
El deshumidificador conserva la energía química del CH<sub>4</sub>, solo requiere energía externa para el proceso de condensación.

Finalmente, las cantidades de masa y energía a lo largo del proceso se reflejan en el

diagrama de la figura 6:

**Figura 6**

*Diagrama final de proceso de producción de biogás con açai (Euterpe precatoria)*



Nota. Se muestra el diagrama completo del proceso con las cantidades en masa y energía generadas a lo largo del mismo. Fuente: Elaboración propia.

**Etapa 2. Evaluación de impactos**

Para evaluar los impactos ambientales del sistema de producción de biogás a partir de residuos de açai, se utilizó el software especializado SimaPro v10, una herramienta

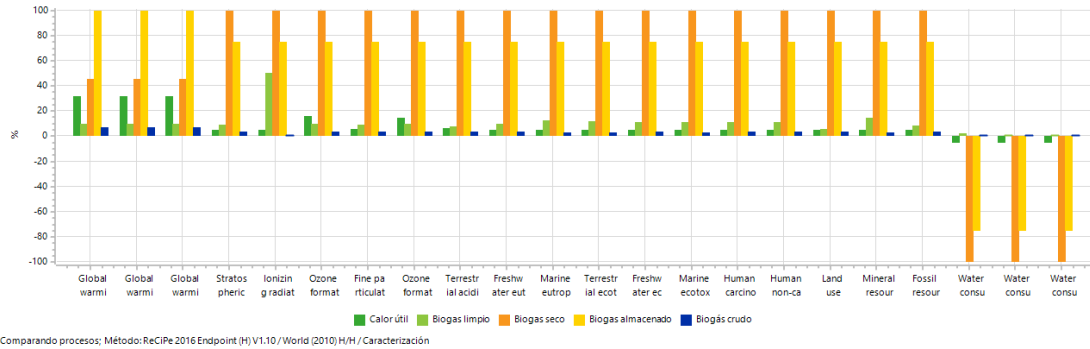
reconocida internacionalmente para análisis de ciclo de vida conforme a las normas ISO 14040-14044. El proceso de modelado se desarrolló de acuerdo con:

Para el inventario de ciclo de vida, se ingresaron los datos primarios obtenidos de los balances de masa y energía calculados en la Etapa 1, incluyendo las cantidades de residuos procesados (1000 kg/día de açai + 4000 kg/día de agua), las emisiones en cada etapa (1208 kg de biogás crudo, 6.01 kg de H<sub>2</sub>S removido, 316.12 kg de agua condensada, 17.7 kg de pérdidas por fugas), y los consumos energéticos (198.55 MJ para calentamiento inicial, 811.62 MJ para deshumidificación). Los datos secundarios se obtuvieron de la base de datos Ecoinvent 3.8 integrada en SimaPro, seleccionando procesos representativos del contexto colombiano para electricidad, transporte y materiales de construcción.

Los resultados obtenidos se presentan en dos gráficas complementarias que permiten visualizar de manera integral los impactos ambientales del sistema. La Figura 7 muestra una caracterización detallada de 19 subcategorías de impacto, comparando los cinco escenarios del proceso (calor útil, biogás limpio, biogás seco, biogás almacenado y biogás crudo) expresados como porcentaje relativo de impacto. Esta representación permite identificar en qué etapa del proceso se concentran los mayores impactos para cada categoría ambiental específica. Por su parte, la Figura 8 agrupa estos impactos en tres grandes áreas de daño: salud humana (Human health), ecosistemas (Ecosystems) y recursos (Resources), facilitando una visión más estratégica de los efectos ambientales del sistema de producción de biogás.

Figura 7

Caracterización detallada (19 subcategorías)



Nota. Esta gráfica de barras agrupadas compara el impacto relativo (en porcentaje) de cinco variantes del proceso de biogás en tres categorías principales de daño ambiental. Fuente: Elaboración con el software SimaPro v10.

El calentamiento global muestra que tanto el biogás seco como el almacenado alcanzan impactos idénticos del 100%, con un salto dramático de 1000% entre la etapa de limpieza y secado. Esto sugiere emisiones masivas de metano durante la deshumidificación. Considerando que el metano tiene un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el CO<sub>2</sub>, las fugas del 2% reportadas podrían socavar significativamente los beneficios climáticos del proyecto.

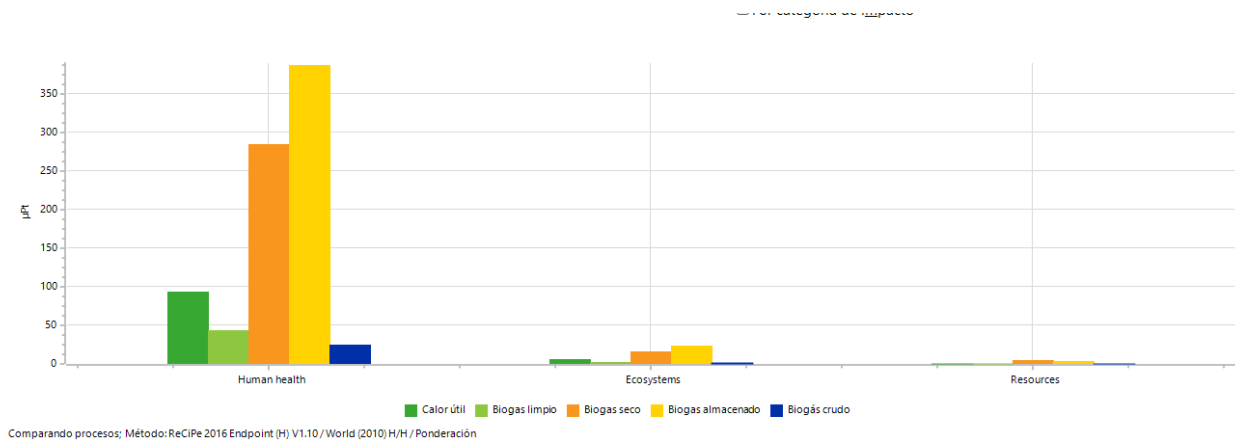
Por otro lado, la toxicidad carcinogénica alcanza 100% en biogás seco y almacenado, representando una alerta crítica que requiere verificación experimental inmediata, considerando posible formación de dioxinas, furanos o hidrocarburos aromáticos policíclicos durante combustión incompleta, siendo altamente peligrosas para salud respiratoria y cardiovascular.

El hallazgo más positivo es el consumo de agua con valores negativos entre -80% y -110%, indicando que el proceso ahorra aproximadamente 8,463 litros diarios: 316 kg

recuperados en el deshumidificador más 8,147 litros ahorrados versus generación termoeléctrica convencional.

### Figura 8

Impactos por categorías (*Human health, ecosystems, resources*)



Nota. Esta gráfica de barras agrupadas presenta una comparación del impacto relativo expresado en porcentaje de cinco variantes del proceso de producción de biogás en tres categorías principales de daño ambiental. Los procesos comparados son el calor útil, el biogás limpio, el biogás seco, el biogás almacenado y el biogás crudo. Cada uno de estos procesos representa una etapa diferente en la cadena de transformación desde los residuos de açai hasta la energía térmica final. Fuente elaboración con el software SimaPro.

Según la gráfica, existe una progresión dramática de impactos: el biogás crudo inicia con apenas 6% de impacto, aumenta ligeramente a 11% después de la limpieza, pero se dispara a 73% tras el secado, hasta alcanzar 100% en el almacenamiento. Este patrón se replica consistentemente en salud humana, ecosistemas y recursos.

El proceso de secado es el segundo punto más crítico, incrementando el impacto en más de 500% respecto a la etapa anterior, considerando que las causas principales incluyen fugas de metano durante el almacenamiento (17.72 kg/día según balance de masa), alto consumo energético en la deshumidificación (811.62 MJ/día), y emisiones de compuestos

orgánicos volátiles y partículas finas. La salud humana concentra el 95% del impacto total, mientras que ecosistemas representa 4.3% y recursos apenas 0.7%.

### **Etapa 3. Estrategias de aprovechamiento y caso de éxito**

Se realizó una entrevista al señor Edgar Montenegro CEO fundador de Amapuri y Corpocampo ONG “*Como empresario y filántropo, he sido uno de los pioneros en el desarrollo del mercado de productos amazónicos y del bosque del Pacífico, beneficiando actualmente a más de 1.300 familias*” (Montenegro, s.f.); el cual fue el experto en el área que nos permitió obtener resultados referentes a las preguntas relacionadas al sector del açáí (*Euterpe precatoria*); aunque sus cultivos no se encuentran en el Guaviare sino en Putumayo, permite tener una visión de los restos y oportunidades que se generan en la producción. Si se desea visualizar las preguntas puntuales realizadas en la entrevista con su respectiva respuesta ver **Anexo 1**.

Entre los datos más relevante proporcionados por el señor Edgar Montenegro comenta que un promedio anual de procesamiento de açáí (*Euterpe precatoria*) corresponde a 1000 toneladas anuales, de las cuales, el 90% corresponde a los residuos; por lo cual, anualmente se obtiene un aproximado de 900 toneladas de residuos de açáí (*Euterpe precatoria*).

Además, el señor comenta las complicaciones estacionarias en el proceso de la generación del residuo, ya que, dicho residuo se genera únicamente en el primer semestre del año, específicamente entre febrero y junio. En este primer semestre del año se dan 10-12 toneladas procesadas diarias de açáí (*Euterpe precatoria*), pasado el primer semestre se procesan entre 2-3 toneladas semanales.

El entrevistado indica que para disponer del residuo tiene un costo de 150 pesos el kilo (costo mínimo), es decir 150000 pesos la tonelada (costo mínimo). Sin embargo, para la disposición del residuo en las zonas amazónica el problema principal radica en que los suelos

de las amazonas son suelos ácidos y con aluminio con grados de toxicidad que afectan la correcta descomposición de los residuos.

#### **Etapa 4. Viabilidad económica**

Para evaluar la viabilidad del proyecto se debe tener en cuenta el VAN (valor presente neto), el cual representa cual es el valor que genera el proyecto al traer los ingresos y egresos futuros al valor presente; el TIR (tasa interna de retorno) que representa la rentabilidad anual del proyecto.

Para obtener dichos criterios de evaluación económica se debe tener en cuenta varios costos. Al iniciar se debe obtener el costo de la inversión total del proyecto, para esto se obtiene los valores relacionados a la inversión directa, donde se relaciona los gastos de construcción e implementación para poner en marcha el proyecto como se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Inversión Directa (ID)*

<b>Inversión Directa (ID)</b>	
<b>Componentes</b>	<b>Costo (COP)</b>
<b>Maquinaria / elementos</b>	\$20.080.726,00
<b>Insumos</b>	\$7.588.800,00
<b>Mano de obra</b>	\$3.265.625,00
<b>Mantenimiento</b>	\$1.800.000,00
<b>Obra civil</b>	\$2.300.000,00
<b>Total</b>	<b>\$35.035.151,00</b>

Nota. Se muestra los costos relacionados a la inversión directa contemplando los costos de maquinaria, insumos, mano de obra, mantenimiento y obra civil. Fuente: Elaboración propia.

Se obtiene un costo (COP) para la inversión directa de \$ 35.035.151 COP, siendo la maquinaria y los elementos implementados para construir cada parte del proceso el costo mayor con un valor de \$ 20.080.726 COP; esto es un valor lógico, ya que en todo el proceso

la inversión necesaria en maquinaria e implementos es el mayor gasto que será requerido para plasmar el proyecto.

Después se debe tener en cuenta el costo de la inversión indirecta, donde se relaciona los gastos necesarios para llevar a cabo el proyecto, sin embargo, no son relacionados directamente a la construcción o funcionamiento del sistema como se muestra en la figura 7:

**Tabla 7**

*Inversión indirecta (Ii)*

<b>Inversión indirecta (Ii)</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo (COP)</b>
<b>Permisos ambientales</b>	1	\$107.841,00
<b>Análisis de laboratorio</b>	12	\$1.200.000,00
<b>Total</b>	<b>13</b>	<b>\$1.307.841,00</b>

Nota. Se muestra los costos relacionados a la inversión indirecta contemplando los costos por permisos ambientales y los análisis de laboratorio anualmente. Fuente: Elaboración propia.

Se obtiene un costo total por la inversión indirecta de \$ 1.307.841 COP, incluyendo los permisos ambientales necesarios para operar y los análisis de laboratorio realizados de forma mensual para llevar un monitoreo de los productos y residuos generados.

Teniendo las inversiones directa e indirecta se obtiene la inversión total necesaria para poner en marcha el proyecto como se muestra en la tabla 8:

**Tabla 8**

*Inversión total (It)*

<b>Inversión Indirecta (Ii)</b>	\$1.307.841,00
<b>Inversión directa (ID)</b>	\$35.035.151,00
<b>Inversión total (It)</b>	<b>\$36.342.992,00</b>

Nota. Se muestra los valores de las inversiones directa e indirecta generando el costo de la inversión total. Fuente: Elaboración propia.

Se requiere de una inversión total/inicial de \$ 36.342.992 COP para el proyecto.

Las ganancias/ ingresos generados en el proyecto se refleja en los productos generados, como producto principal se genera el biogás que pasa hacia la caldera generando calor que será usado como fuente de energía y como ingreso secundario se generan los residuos del biodigestor llamados digestato / biol. Teniendo en cuenta la cantidad que se genera al día ingresando 11 kg/día en el proceso se obtiene el costo por kg y el ingreso diario y anual como se muestra en la tabla 9:

**Tabla 9**

*Ingresos diarios y anuales por Biogás y Biol*

Elemento	Cantidad/3 meses	Cantidad día	Cantidad/año	Costo	Ingreso por día	Ingreso 3 meses	Ingreso anual
<b>Biogas / calor (m3)</b>	235,59	2,61766666	942,36	\$1.953,00	\$5.112,30	\$460.107,27	\$1.840.429,08
<b>Biol (residuo) (kg)</b>	3792	42,1333333	15168	\$800,00	\$33.706,67	\$3.033.600,00	\$12.134.400,00
<b>Ingreso total</b>				<b>\$ 4.250,00</b>	<b>\$38.818,97</b>	<b>\$3.493.707,27</b>	<b>\$13.974.829,08</b>

Nota. Se muestra las cantidades generadas por día ingresando como alimentación 11 kg de residuos orgánicos, las cantidades anuales, el costo por kg, los ingresos diarios y anuales.

Fuente: elaboración propia.

Se obtiene por 11 kg de residuos al día ingresados al biodigestor unos ingresos diarios de \$ 38.818 COP y unos ingresos anuales de \$ 13.974.829 COP.

Con los costos de las inversiones y los ingresos se deben obtener los criterios de evaluación económica como se muestra en la tabla 10:

**Tabla 10**

*Criterios de evaluación económica (VAN, TIR)*

<b>VAN</b>	\$17.761.647,99
<b>TIR</b>	29%

Nota. Se muestra los valores finales correspondiente a los criterios de evaluación económica VAN (valor presente neto), el cual representa cual es el valor que genera el proyecto al traer los ingresos y egresos futuros al valor presente; el TIR (tasa interna de retorno) que representa la rentabilidad anual del proyecto.

Considerando una inversión total de \$ 36.342.992 COP y unos ingresos anuales aproximados de \$ 13.974.829 COP. Los indicadores financieros obtenidos fueron:

- **Valor Actual Neto (VAN): \$ 17.761.647 COP=** El VAN positivo indica que el proyecto genera un valor económico adicional sobre la inversión inicial, lo que indica que la implementación del sistema de biogás permite recuperar el valor de la inversión.
- **Tasa Interna de Retorno (TIR): 29 % =** Un TIR del 29% muestra que el proyecto es altamente rentable, superando ampliamente las tasas de retorno tradicionales de alternativas de inversión, lo que lo convierte en una opción atractiva desde el punto de vista financiero.

### **Conclusiones**

El software SimaPro reveló que el 73% de los impactos ambientales del ciclo de vida del biogás se concentra en el secado y almacenamiento, afectando principalmente la salud

humana (95%), seguido por ecosistemas (4.3%) y recursos (0.7%). Aunque el proceso es altamente eficiente para mitigar el cambio climático cuando se optimiza, las fugas de metano del 2% y el consumo energético de 811.62 MJ/día en estas etapas críticas pueden reducir significativamente sus beneficios ambientales si no se gestionan adecuadamente.

El balance energético muestra que por cada 1000 kg de residuos de açai con 4000 kg de agua, el sistema genera 1208 kg de biogás crudo y 3792 kg de digestato. El metano producido (299.3 kg/día) proporciona 3,259 kWh diarios de energía térmica útil. Tras el arranque inicial, el sistema es autosuficiente energéticamente: el calor de la digestión anaerobia (45.9 MJ/día) más la radiación solar captada por la geomembrana (34.67 MJ/día) mantienen la temperatura óptima de 35°C sin calentamiento externo, aprovechando las condiciones climáticas tropicales del Guaviare.

El análisis de ciclo de vida con SimaPro demuestra que la producción de biogás con residuos de açai puede transformar un problema ambiental en una oportunidad de desarrollo sostenible, mediante control estricto de emisiones fugitivas, optimización de la segregación de residuos y buenas prácticas en el manejo del digestato. La evaluación confirma que la digestión anaerobia de estos residuos es viable y favorable ambiental, social y económicamente para el Guaviare. Se recomienda priorizar mejoras en el secado, almacenamiento y manejo del digestato, implementando sistemas de control de fugas con sensores continuos, tecnologías eficientes de deshumidificación y aprovechamiento integral del digestato mediante compostaje para cerrar el ciclo de nutrientes.

El análisis financiero demuestra que la producción de biogás con residuos de açai es económicamente viable y altamente rentable en el Guaviare. Los indicadores obtenidos — VAN de \$17,761,648 COP y TIR del 29% confirman que la inversión inicial de \$36,342,992

COP se recupera en aproximadamente 2.6 años. Esta rentabilidad del 29% anual supera ampliamente las tasas del sector energético y agroindustrial, posicionando al proyecto como una alternativa económicamente atractiva.

En síntesis, el proyecto de biogás con residuos de açai en el Guaviare ofrece una solución integral a desafíos ambientales, sociales y económicos. La investigación confirma su viabilidad técnica, rentabilidad económica y beneficio ambiental al implementar mejoras en las etapas críticas de secado y almacenamiento. El sistema aprovecha 1,571 toneladas anuales de residuos sin disposición adecuada, genera energía renovable, produce biofertilizante y reduce emisiones de gases de efecto invernadero. Más allá de estos beneficios cuantificables, fortalece la autonomía energética rural, beneficia directamente a 234 familias (incluyendo mujeres cabeza de hogar y población desplazada) y promueve un modelo de bioeconomía compatible con la conservación amazónica. Su implementación exitosa requiere combinar excelencia técnica en control de emisiones, monitoreo continuo, capacitación del personal y compromiso institucional para escalar el modelo hacia otras regiones amazónicas con problemáticas similares.

## **Referencias**

*Alibaba.com reads*. (7 de Julio de 2024). Obtenido de ¿Qué es Alibaba? Todo lo que necesitas saber: <https://reads.alibaba.com/es/what-is-alibaba-everything-you-need-to-know/>

*Ambiente, vision Amazonia* . (13 de Julio de 2020). Obtenido de Asaí: una oferta del bosque:

<https://visionamazonia.minambiente.gov.co/news/asai-una-oferta-del-bosque/>

*AQUAE FUNDACION*. (11 de Marzo de 2021). Obtenido de Descubre todos los detalles

acerca del biodigestor: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/biodigestor/>

*Argentina.gob.ar*. (2025). Obtenido de Biodigestores: los residuos como generadores de energía:

<https://www.argentina.gob.ar/interior/ambiente/accion/biodigestores#:~:text=Un%20biodigestor%20es%20un%20recipiente,mediante%20un%20generador%20a%20gas.>

Asaí: una oferta del bosque – Visión Amazonía. (n.d.).

<https://visionamazonia.minambiente.gov.co/news/asai-una-oferta-del-bosque/>

Ayala, M. L. (n.d.). *Acai, cultivo promisorio que empresarios brasileiros impulsarán en la*

*COP 16*. <https://www.revistaecoguia.com/32-cop16/4108-acai-cultivo-promisorio-que-empresarios-brasileiros-impulsaran-en-la-cop-16>

*Ayllu team*. (2020). Obtenido de Semilla asai corteza :

[https://aylluartesania.es/index.php?id\\_product=1882&rewrite=semilla-asai-corteza-&controller=product](https://aylluartesania.es/index.php?id_product=1882&rewrite=semilla-asai-corteza-&controller=product)

Barba Ramírez, C. T., Rojas Camargo, L. F., & Ardila Mora, A. (2024). Generación de biogás de desechos de la agroindustria. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingeniería

BIOGÁS. (n.d.). Unidad Administrativa Especial De Servicios Públicos -UAESP-.

<https://www.uaesp.gov.co/content/biogas>

Bordino, J. (2023, June 8). Efluentes: qué son y características. *geoenciclopedia.com*.

<https://www.geoenciclopedia.com/efluentes-que-son-y-caracteristicas-668.html>

*Camara de comercio de españa*. (2023). Obtenido de Ecodiseño:Diseño de productos-

servicios sostenibles: <https://www.camara.es/innovacion-y-competitividad/como->



*Editorial universidad Santiago de Cali* . (s.f.). Obtenido de

<https://libros.usc.edu.co/index.php/usc/catalog/download/103/149/2053?inline=1>

El potencial del biogás en la reducción de emisiones de GEI - Biogás Industrial. (n.d.).

<https://biogasindustrial.com/potencial-del-biogas-para-reducir-emisiones-gei/>

*Emisiones atmosféricas fuentes fijas*. (2020, October 1).

[https://www.anla.gov.co/01\\_anla/allcategories-es-es/250-tramites-y-servicios/tramites/permisos-y-autorizaciones/emisiones-atmosfericas-fuentes-fijas](https://www.anla.gov.co/01_anla/allcategories-es-es/250-tramites-y-servicios/tramites/permisos-y-autorizaciones/emisiones-atmosfericas-fuentes-fijas)

*Envira*. (23 de Enero de 2024). Obtenido de Analisis de ciclo de vida:

<https://envira.es/es/analisis-de-ciclo-de-vida/>

*Eurofins*. (22 de Marzo de 2024). Obtenido de Análisis de Ciclo de Vida (ACV): qué es y

para qué sirve: <https://www.eurofins-environment.es/es/analisis-de-ciclo-de-vida-que-es/>

*Ferrovial*. (2025). Obtenido de ¿Que es el biogas?:

<https://www.ferrovial.com/es/recursos/biogas/#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s%20se,de%20descomponer%20la%20materia%20org%C3%A1nica.>

Final, I. (s/f). *De la práctica al análisis de las barreras a la inversión en biogás en Colombia*

*y las medidas para abordarlas, a partir de la experiencia de los desarrolladores y*

*otros actores relevantes*. Ledslac.org. Recuperado el 20 de agosto de 2025, de

<https://ledslac.org/wp-content/uploads/2021/08/Informe-final-biogas-Colombia-v.06082021->

[final.pdf#:~:text=alto%20contenido%20de%20metano%20\(50%20a%2060%25\)](https://ledslac.org/wp-content/uploads/2021/08/Informe-final-biogas-Colombia-v.06082021-final.pdf#:~:text=alto%20contenido%20de%20metano%20(50%20a%2060%25))

*Función pública*. (13 de Mayo de 2014). Obtenido de Ley 1715 de 2014:

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

Fuster. (2025, June 12). *Digestato. Qué es y qué usos tiene*. BLOG.

<https://www.repuestosfuster.com/blog/digestato-que-es-y-que-usos-tiene/>

Garfí, M., Castro, L., Montero, N., Escalante, H., & Ferrer, I. (2018). Evaluating environmental benefits of low-cost biogas digesters in small-scale farms in Colombia: A life cycle assessment. *Bioresource Technology*, 274, 541–548.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.007>

Garrido, P. (2024, December 6). Cómo Reducir la Emisión de Gases de Efecto Invernadero con Biogás. Miogas | Biogás al alcance de todos. <https://miogas.com/blog/como-reducir-la-emision-de-gases-de-efecto-invernadero/>

*Geo innova*. (11 de Junio de 2025). Obtenido de Principales herramientas para el Análisis de Ciclo de Vida: comparativa completa de software: <https://geoinnova.org/blog-territorio/principales-herramientas-para-el-analisis-de-ciclo-de-vida/#:~:text=recurso%20naturales%2C%20etc.-,2.,mitigaci%C3%B3n%20clim%C3%A1tica%20y%20econom%C3%ADa%20circul> ar.

Graziati, G. (2023, April 26). Qué es el açai: propiedades y beneficios. *ecologiaverde.com*.

<https://www.ecologiaverde.com/que-es-el-acai-propiedades-y-beneficios-4392.html>

Hale, M. (12 de Julio de 2021). *HRS*. Obtenido de La HIDRÓLISIS térmica impulsa la producción de biogás: <https://www.aguasresiduales.info/expertos/tribuna-opinion/la-hidrolisis-termica-impulsa-la-produccion-de-bio-I75yx>

Hernández Gómez, M. S., Castro Rodríguez, S. Y., Giraldo Benavides, B., & Barrera García, J. A. (Comps.). (2018). *Seje, moriche, asaí: Palmas amazónicas con potencial*. Bogotá, Colombia: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI. ISBN: 978-958-5427-06-8.

- Isaza Aranguren, C., Galeano, G., & Bernal, R. (2014). Manejo actual del asaí (*Euterpe precatoria* Mart.) para la producción de frutos en el sur de la Amazonia colombiana. *Colombia Forestal*, 17(1), enero-junio
- ISCC System GmbH. (2024, January 30). *Project Presentation - Life Cycle Assessment of the Production of Sustainable Aviation Fuels (SAF) and Renewable Diesel (RD) from Oil Palm and its Crop Residues in Colombia - ISCC System*. ISCC System.  
<https://www.iscc-system.org/news/project-presentation-life-cycle-assessment-of-the-production-of-sustainable-aviation-fuels-saf-and-renewable-diesel-rd-from-oil-palm-and-its-crop-residues-in-colombia/>
- issuu*. (20 de Abril de 2021). Obtenido de Guía de buenas prácticas para la cosecha de frutos de asaí (*Euterpe precatoria*):  
[https://issuu.com/conservacionamazonica/docs/buenas\\_pra\\_cticas1](https://issuu.com/conservacionamazonica/docs/buenas_pra_cticas1)
- La Nota Económica. (2025, March 3). *El açáí, el superalimento que está transformando el Pacífico y la Amazonía colombiana - La Nota Económica*.  
<https://lanotaeconomica.com.co/movidas-empresarial/el-acai-el-superalimento-que-esta-transformando-el-pacifico-y-la-amazonia-colombiana/>
- Mayoreo online*. (2010). Obtenido de Descubre el nutritivo asaí: el tesoro amazonico-  
Mayoreo online:  
[https://cdn.shopify.com/s/files/1/0012/3512/4273/files/Acai\\_Palmera.jpg?v=1595442](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0012/3512/4273/files/Acai_Palmera.jpg?v=1595442)  
379
- Ministerio de ambiente*. (s.f.). Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-99-1993.pdf>
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible*. (2023). Obtenido de Plan de zonificación ambiental: <https://www.minambiente.gov.co/ordenamiento-ambiental-territorial-y-sistema-nacional-ambiental-sina/plan-de-zonificacion-ambiental/>

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (5 de Junio de

2008). Obtenido de Resolución numero 909: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-909-de-2008.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución No. 2 del 01 de noviembre de 2017: Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. Bogotá, D.C., Colombia.

Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. (3 de Mayo de 2023). Obtenido de Plan de orientamiento territorial (POT): <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-vivienda-espacio-urbano-y-territorial-plan-ordenamiento-territorial-pot#:~:text=Un%20POT%20es%20en%20esencia,territorial%20tienen%20los%20mismos%20contenidos.>

Miogas. (2024, June 21). Biogás y Huella de Carbono: Impacto Positivo en la Reducción de CO2 - Miogas. Miogas | Biogás al alcance de todos. <https://miogas.com/blog/biogas-y-huella-de-carbono-impacto-positivo-en-la-reduccion-de-co2/>

Monteiro, A. F., Miguez, I. S., Silva, J. P., & Silva, A. S. (29 de Julio de 2019). *Scientifics reports*. Obtenido de High concentration and yield production of mannose from açai (*Euterpe oleracea* Mart.) seeds via mannanase-catalyzed hydrolysis: [https://www-nature-com.translate.goog/articles/s41598-019-47401-3?error=cookies\\_not\\_supported&code=18c0bbfa-92f6-4f62-88a9-497757312e75&\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www-nature-com.translate.goog/articles/s41598-019-47401-3?error=cookies_not_supported&code=18c0bbfa-92f6-4f62-88a9-497757312e75&_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)

Montenegro, E. (s.f.). *Linkedin*. Obtenido de Linkedin: <https://www.linkedin.com/in/edgar-montenegro-30323716/?originalSubdomain=co>

Nascimento, M. D., & Silva, R. C. (2025). *Dialnet*. Obtenido de O uso de tecnologias para o mapeamento dos resíduos do açai e alternativas sustentáveis no município de Castanhal-Pará: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10371973>

- Nivaldo, C. R. J. (2025, June 10). *Biocombustibles. Viabilidad económica de la generación de biogás a partir de residuos de açáí y residuos de poda en San José del Guaviare - Colombia*. <https://repository.universidadean.edu.co/entities/publication/daa9a9ae-4176-49ac-9fd8-fd6d616d5847>
- Online Browsing Platform (OBP)*. (s.f.). Obtenido de ISO 50001:2011: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:50001:ed-1:v1:es>
- Online Browsing Platform (OBP)*. (2018). Obtenido de ISO 14067:2018: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14067:ed-1:v1:es>
- Orozco, K. T. M., Carpio, A. S. R., Rojas, I. C., & Pardo, M. a. H. (2016). Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca. *Revista ION*, 29(2), 23–36. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016002>
- Pure strategies*. (s.f.). Obtenido de RM2 aprovecha la evaluación del ciclo de vida para impulsar la innovación del producto y el valor comercial: [https://purestrategies.com/case-study/rm2-leverages-life-cycle-assessment-to-drive-product-innovation-and-business-value?utm\\_source=chatgpt.com](https://purestrategies.com/case-study/rm2-leverages-life-cycle-assessment-to-drive-product-innovation-and-business-value?utm_source=chatgpt.com)
- Peña R., L. F., G. B., B., Barrera G., J. A., & Hernández G., M. S. (2012). Obtención de pulpa de açáí (*Euterpe precatoria* Mart) en la Amazonía Norte Colombiana. *Vitae*, 19(1), S147-S149. Universidad de Antioquia. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169823914041>
- Procolombia. (n.d.). Amapurí: El açáí colombiano que alimenta al mundo y siembra un futuro en paz | Procolombia. Procolombia. <https://procolombia.co/sala-de-prensa/noticias/amapuri-el-acai-colombiano-que-alimenta-al-mundo-y-siembra-un-futuro-en-paz>

*Repsol*. (11 de Septiembre de 2023). Obtenido de Cómo gestionar de manera eficiente los

desechos : <https://www.repsol.com/es/energia-avanzar/energia/residuos-organicos/index.cshtml>

*repsol*. (2025). Obtenido de transforma tus residuos de energia: [http://repsol.com/es/energia-](http://repsol.com/es/energia-futuro/movilidad-sostenible/biogas/index.cshtml)

futuro/movilidad-sostenible/biogas/index.cshtml

*RIT Rochester institute of technology* . (2 de Julio de 2020). Obtenido de ¿Qué es el análisis

del ciclo de vida (ACV)?: <https://www-rit->

edu.translate.google.com/sustainabilityinstitute/blog/what-life-cycle-assessment-

lca?\_x\_tr\_sl=en&\_x\_tr\_tl=es&\_x\_tr\_hl=es&\_x\_tr\_pto=sge#:~:text=%C2%BFCu%C

3%A1les%20son%20los%20beneficios%20de,y%20otras%20pol%C3%ADticas%20

de%20sostenibilidad

Robledo, P. P. (15 de Agosto de 2025). *Pais circular*. Obtenido de El panorama de los

biodigestores en Chile, una alternativa para la gestión de los residuos orgánicos:

[https://www.paiscircular.cl/economia-circular/el-panorama-de-los-biodigestores-en-](https://www.paiscircular.cl/economia-circular/el-panorama-de-los-biodigestores-en-chile-una-alternativa-para-la-gestion-de-los-residuos-organicos/)

chile-una-alternativa-para-la-gestion-de-los-residuos-organicos/

Saker, A. J., & Prieto, G. (2020). *PLAN INTEGRAL DE GESTIÓN DE CAMBIO*

*CLIMATICO PARA EL DEPARTAMENTO DEL GUAVIARE*. Obtenido de Area de

estudio y gestion de información: [https://www.cda.gov.co/apc-aa-](https://www.cda.gov.co/apc-aa-files/62333031323138353938373665323335/pigcct-guaviare.pdf)

files/62333031323138353938373665323335/pigcct-guaviare.pdf

*ScienceDirect*. (2022). Obtenido de Seaweed biomass of the Philippines: Sustainable

feedstock for biogas production: <https://www-sciencedirect->

com.translate.google.com/topics/engineering/acidogenesis?\_x\_tr\_sl=en&\_x\_tr\_tl=es&\_x\_tr\_

hl=es&\_x\_tr\_pto=rq#:~:text=Acidogenesis%20is%20the%20fermentation%20stage,2

%20(Sambusiti%2C%202013).

*Sector ambiente y desarrollo*. (17 de Junio de 2015). Obtenido de Decreto 1076 de 2015

Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible:

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

*Seguridad y eficiencia en la producción de biogás - Biogás Industrial*. (n.d.).

<https://biogasindustrial.com/seguridad-y-eficiencia-del-biogas/>

*SimaPro*. (2025). Obtenido de SimaPro Craft: <https://simapro->

[com.translate.google.com/plans/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc&\\_x\\_tr\\_hist=true](https://simapro-com.translate.google.com/plans/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc&_x_tr_hist=true)

Silinto, B. F., Van Der Laag Yamu, C., Zuidema, C., & Faaij, A. P. (2024). Hybrid renewable energy systems for rural electrification in developing countries: A review on energy system models and spatial explicit modelling tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114916. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114916>

Colmenar Viejo Tres Cantos. (2025, August 26). Riesgos para la salud de las plantas de biogás. *Stop Biogas Colmenar Viejo Tres Cantos*.

<https://stopbiogascolmenar.org/estudios-cientificos/riesgos-para-la-salud-de-las-plantas-de-biogas/>

*The circular campus*. (11 de Enero de 2023). Obtenido de Analisis de ciclo de vida en un producto: <https://www.ecoembesthecircularcampus.com/cuales-son-las-fases-del-analisis-de-ciclo-de-vida-de-un-producto/>

*Transformación de frutos amazónicos del Guaviare en la COP16 – Marandua Stereo 100.7*

*FM Noticias del Guaviare*. (n.d.). <https://marandua.com.co/transformacion-de-frutos-amazonicos-del-guaviare-en-la-cop16/>

Trujillo-Becerra, M., Canales, N., Acuña, R., Gómez, J., Murcia, M., Purkey, D., & Yepes, Y. (18 de Febrero de 2025). *Biodiversidad en la practica* . Obtenido de La red de

valor y la biodiversidad: el caso del asaí o naidí para la bioeconomía de Colombia:

<https://revistas.humboldt.org.co/index.php/BEP/article/view/1206/1259>

*upra.* (2022). Obtenido de Microanálisis evaluaciones agropecuarias-EVAs Guaviare:

[https://upra.gov.co/Kit\\_Territorial/2-](https://upra.gov.co/Kit_Territorial/2-)

[%20Informaci%C3%B3n%20por%20Departamentos/GUAVIARE/3-](https://upra.gov.co/Kit_Territorial/2-%20Informaci%C3%B3n%20por%20Departamentos/GUAVIARE/3-)

[%20Microan%C3%A1lisis%20Evaluaciones%20agropecuarias%202023-](https://upra.gov.co/Kit_Territorial/2-%20Microan%C3%A1lisis%20Evaluaciones%20agropecuarias%202023-)

[Guaviare.pdf](https://upra.gov.co/Kit_Territorial/2-%20Microan%C3%A1lisis%20Evaluaciones%20agropecuarias%202023-Guaviare.pdf)

Varling, A. S., Christensen, T. H., & Bisinella, V. (2022). Life cycle assessment of alternative biogas utilisations, including carbon capture and storage or utilisation.

*Waste Management*, 157, 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.005>

## **Anexos**

[Anexo 1 - Resultados metodo cualitativo](#)

[Anexo 2 - Balance de masa y energia](#)