



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUCTURA Y
TERRITORIO (ILATIT)**

INGENIERIA QUIMICA

Biogás como Motor de Desarrollo Social: Aprovechamiento de Residuos Orgánicos
para la Producción de Biogás en la Comunidad de Torin, Dr. Juan Eulogio
Estigarribia, Caaguazú, Paraguay

MARIA ELENA ZABALA BRITOS

Foz de Iguazú
Año 2025



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUCTURA Y
TERRITORIO (ILATIT)**

INGENIERIA QUIMICA

Biogás como Motor de Desarrollo Social: Aprovechamiento de Residuos Orgánicos para la Producción de Biogás en la Comunidad de Torin, Dr. Juan Eulogio Estigarribia, Caaguazú, Paraguay

MARIA ELENA ZABALA BRITOS

Trabajo de Conclusión de Curso presentado al Instituto Latino-Americano de Tecnología, Infraestructura y Territorio de la Universidad Federal de Integración Latino-Americana, como requisito parcial para la obtención del título de Bachiller en Ingeniería Química.

Orientador: Prof. Dra. Andreia Cristina Furtado

Co-Orientador: Dr. Ing. Ricardo Morel Hartman

Foz de Iguazú

2025

MARIA ELENA ZABALA BRITOS

BIOGÁS COMO MOTOR DE DESARROLLO SOCIAL: APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS
PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LA COMUNIDAD DE TORIN, DR. JUAN EULOGIO
ESTIGARRIBIA, CAAGUAZÚ, PARAGUAY

Trabajo de Conclusión de Curso presentado al Instituto Latino-Americano de Tecnología, Infraestructura y Territorio de la Universidad Federal de Integración Latino-Americana, como requisito parcial para la obtención del título de Bachiller en Ingeniería Química.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

ANDREIA CRISTINA FURTADO

Data: 10/12/2025 10:07:07-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador: Prof. Dra. Andreia Cristina Furtado
UNILA

Co- Orientador: Dr. Ing. Ricardo Morel Hartmann
UNILA

Prof. Dr. Cesar Adolfo Rodriguez Sotomonte
UNILA

Prof.Dr. Rodrigo Monteiro Eliott
UNILA

Foz de Iguazú, 07 de agosto de 2025

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Maria Elena Zabala Britos

Curso: Engenharia Quimica

Tipo de Documento

- (.....) graduação (.....) artigo
- (.....) especialização (.....) trabalho de conclusão de curso
- (.....) mestrado (.....) monografia
- (.....) doutorado (.....) dissertação
- (X) tese
- (.....) CD/DVD – obras audiovisuais
- (.....) _____

Título do trabalho acadêmico: BIOGÁS COMO MOTOR DE DESARROLLO SOCIAL: APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LA COMUNIDAD DE TORIN, DR. JUAN EULOGIO ESTIGARRIBIA, CAAGUAZÚ, PARAGUAY

Nome do orientador(a): ANDREIA CRISTINA FURTADO

Data da Defesa: 07/08/2025

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

- a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.
- b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino- Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons* **Licença 3.0 Unported**.

Foz do Iguaçu, ____ de _____ de ____.

Assinatura do Responsável

"Nunca dudes que un pequeño grupo de personas comprometidas pueda cambiar el mundo. De hecho, es lo único que lo ha logrado."

(MEAD, 1972, p. 45)

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con todo mi cariño y gratitud a mi familia, quienes han sido mi mayor apoyo en cada momento de mi vida. Gracias por su amor incondicional, por su paciencia y por siempre creer en mí, incluso cuando yo mismo dudaba. Cada sacrificio, cada palabra de aliento y cada gesto de cariño han sido fundamentales para llegar hasta aquí. ¡Este logro es NUESTRO!

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero comenzar agradeciendo a Dios, por la vida y por guiarme en cada paso de este camino, por darme fuerzas en los momentos de dificultad y por bendecirme con la oportunidad de llegar hasta aquí.

A la Virgen, por su protección constante y por velar por mí en cada instante de mi vida. Gracias por su intercesión, por darme paz y serenidad en los momentos de desesperación.

A MI FAMILIA: Mamá, Papá y hermanos, por su amor incondicional, por su apoyo constante, por acompañarme siempre y por ser mi motor en cada paso de este largo camino. La confianza de ustedes me ha impulsado a seguir adelante y a no rendirme.

A mis amigos, Anika Godoy, Belén Valdez, Marcelo López quienes estuvieron conmigo en cada momento de estudio, de incertidumbre y de alegría. Gracias por compartir juntos las experiencias que hicieron que este proceso fuera único y más liviano. Su compañerismo y dedicación fueron una gran fuente de inspiración.

A mis amigos que siempre estuvieron a mi lado, independientemente de las circunstancias. Gracias por su amistad inquebrantable, por los momentos de diversión y por su apoyo en los momentos más difíciles.

A mis profesores, por transmitir sus conocimientos y por formar una base sólida en mi educación. Cada uno de ustedes ha dejado una huella en mi desarrollo profesional y personal. Su paciencia y guía fueron esenciales para alcanzar este logro.

A mis orientadores de tesis, por su valioso acompañamiento y consejos durante el proceso. Su experiencia y su disposición para ayudarme en cada etapa de este trabajo fueron fundamentales para su realización.

Finalmente, a todos aquellos que, de una u otra manera, contribuyeron a mi formación y éxito en esta etapa de mi vida. ¡Gracias!

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade de implementação de um sistema de produção de biogás na comunidade de Torin, localizada em Caaguazú, Paraguai, a partir do aproveitamento de resíduos orgânicos domiciliares. Foi realizada uma amostragem em 10 residências selecionadas, com coleta e caracterização dos resíduos gerados durante oito dias consecutivos. Foram determinados parâmetros-chave como sólidos totais ($10,32\% \pm 2,07$), sólidos voláteis ($75\% \pm 18,27$), teor de cinzas ($25\% \pm 18,27$), potencial bioquímico de metano (PBM), utilizando metodologia padrão e valores de referência da literatura. A estimativa de produção diária de biogás por família foi de $0,0291 \text{ m}^3$, equivalente a $0,1746 \text{ kWh}$ de energia útil. Em seguida, foi construído um biodigestor artesanal com capacidade de 200 L, utilizado como protótipo para estimar os custos de implementação em 103,53 USD (761.000 Gs) e verificar sua viabilidade técnica. Os resultados demonstraram viabilidade técnica através do dimensionamento adequado com tempo de retenção hidráulica de 20 dias e volume útil de 24 L por família, ocupando apenas 12% da capacidade do biodigestor. A viabilidade econômica foi comprovada pelo custo do protótipo 74% inferior a sistemas comerciais (500-1.500 USD) e pelo potencial de economia mensal de 0,711 USD por família (5.226 Gs) ao substituir GLP. A replicabilidade do sistema foi reforçada pela alta aceitação comunitária, com 100% dos entrevistados dispostos a participar e capacitar-se. Além disso, foram aplicados questionários com os moradores para avaliar a percepção da comunidade em relação ao sistema proposto, obtendo-se alta aceitação e disposição para participar da iniciativa. De modo geral, concluiu-se que o uso de resíduos orgânicos para a produção de biogás representa uma solução viável, econômica e sustentável em contextos rurais.

Palavras-chave: biogás; resíduos orgânicos; biodigestor artesanal; comunidade rural; sustentabilidade.

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la viabilidad de implementar un sistema de producción de biogás en la comunidad de Torin, Caaguazú, Paraguay, mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos domiciliarios. Se realizó un muestreo en 10 viviendas seleccionadas, recolectando y caracterizando los residuos durante ocho días consecutivos. Se determinaron parámetros clave como sólidos totales ($10,32\% \pm 2,07$), sólidos volátiles ($75\% \pm 18,27$), contenido de cenizas ($25\% \pm 18,27$), potencial bioquímico de metano (PBM), utilizando métodos estándar y valores de referencia de la literatura. La estimación de producción diaria de biogás por familia fue de $0,0291 \text{ m}^3$ (equivalente a $0,1746 \text{ kWh}$ de energía útil). Posteriormente, se construyó un biodigestor artesanal de 200 L como prototipo, con un costo de implementación de 103,53 USD (761.000 Gs), verificándose su viabilidad técnica mediante un dimensionamiento adecuado con tiempo de retención hidráulica de 20 días y volumen útil de 24 L por familia, ocupando solo el 12% de la capacidad del sistema. La viabilidad económica quedó demostrada por un costo 74% inferior a biodigestores comerciales (500-1.500 USD) y un ahorro mensual estimado de 0,711 USD por familia (5.226 Gs) al sustituir GLP. La alta aceptación comunitaria (100% de los encuestados dispuestos a participar y capacitarse) confirma la replicabilidad del sistema. Se concluye que el uso de residuos orgánicos para producción de biogás representa una solución viable, económica y sostenible en contextos rurales.

Palabras clave: biogás; residuos orgánicos; biodigestor artesanal; comunidad rural; sostenibilidad.

ABSTRACT

This study aimed to assess the feasibility of implementing a biogas production system in the community of Torin, Caaguazú, Paraguay, through the use of household organic waste. Sampling was conducted in 10 selected households, with waste collected and characterized over eight consecutive days. Key parameters such as total solids ($10.32\% \pm 2.07$), volatile solids ($75\% \pm 18.27$), ash content ($25\% \pm 18.27$), biochemical methane potential (BMP) were determined using standard methods and literature reference values. The estimated daily biogas production per family was 0.0291 m^3 (equivalent to 0.1746 kWh of usable energy). A 200-liter artisanal biodigester prototype was built at an implementation cost of 103.53 USD (761,000 Gs), with technical feasibility confirmed through proper sizing (hydraulic retention time = 20 days; useful volume/family = 24 L, using only 12% of digester capacity). Economic viability was demonstrated by a prototype cost 74% lower than commercial systems (USD 500-1,500) and estimated monthly savings of 0.711 USD per family (5,226 Gs) when replacing LPG. High community acceptance (100% of respondents willing to participate and receive training) supports system replicability. It is concluded that organic waste for biogas production is a viable, economical, and sustainable solution for rural settings.

Keywords: biogas; organic waste; artisanal biodigester; rural community; sustainability.

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Localización Geográfica del Departamento de Caaguazú	21
Figura 2: Localización Geográfica del Distrito de Dr. Juan E. Estigarribia	22
Figura 3: Localización Geográfica de la Comunidad de Torin	24
Figura 4: Esquema de la Digestión Anaeróbica	25
Figura 5: Componentes de un Biodigestor	31
Figura 6: Esquema de un Biodigestor Indiano	32
Figura 7: Esquema de un Biodigestor Chino	33
Figura 8: Biodigestor Tubular	34
Figura 9: Entrada de biomasa, salida de gas y salida de biofertilizante.	48
Figura 11: Tipos de residuos orgánicos generados en los hogares encuestados.	53
Figura 12: Formas actuales de disposición de residuos en la comunidad	54
Figura 13: Conocimiento sobre el biogás entre los encuestados	55
Figura 14: Conocimiento sobre el uso de biodigestores	55
Figura 15: Nivel de preocupación por el impacto ambiental de los residuos	56
Figura 16: Percepción sobre la gestión de residuos en Torín	56
Figura 17: Aceptación del uso de biogás como solución comunitaria	57
Figura 18: Disposición a separar residuos para un biodigestor comunitario.	57
Figura 19: Interés en capacitarse sobre biogás y biodigestores	58
Figura 20: Interés en utilizar el biofertilizante generado en la huerta	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 - Composición química del biogás	25
Tabla 2 - Residuos domiciliarios biodegradables (kg/día)	45
Tabla 3 - Resultados de la caracterización de los residuos.	46
Tabla 4 - Materiales para la construcción de Biodigestor	49
Tabla 5 - Estimación de producción de biogás y ahorro energético por familia y comunidad	50
Tabla 6: Precio Limite del GLP	52
Tabla 7: Costo del biogás por m ³	52

SUMARIO

1-INTRODUCCIÓN.....	16
2- OBJETIVOS	18
OBJETIVO GENERAL.....	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3- JUSTIFICACIÓN	19
4- REVISIÓN TEÓRICA	21
4.1. CONTEXTO TERRITORIAL Y SOCIOECONÓMICO	21
4.1.1. Departamento De Caaguazú	21
4.1.2. Distrito Dr. Juan Eulogio Estigarribia	22
4.1.3. Comunidad De Torin.....	23
4.2. BIOGÁS	24
4.2.1. Introducción	24
4.2.2. Fundamentos Del Biogás, Producción Y Etapas De La Digestión Anaeróbica.....	24
4.2.3. Parámetros Que Interfieren En La Biodigestión.....	27
4.2.4. Usos Y Aplicaciones Del Biogás	29
4.3. BIODIGESTORES	30
4.3.1. Fundamentos.....	30
4.3.2. Modelos De Biodigestores	31

4.3.2.1- <i>Biodigestor indiano</i>	32
4.3.2.2- <i>Biodigestor Chino</i>	32
4.3.2.3- <i>Biodigestor Canadiense (Tubular)</i>	33
4.3.2.4- <i>Biodigestor Por Lotes (Batelada)</i>	34
4.3.3. Dimensionamiento Del Biodigestor	35
4.3.4. Impactos Sociales Y Ambientales.....	36
4.3.5. Perspectivas Futuras Y Desafíos.....	36
5- METODOLOGÍA.....	37
5.1. ANÁLISIS Y CUANTIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS	37
5.2. DEFINICIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR	39
5.3. CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR.....	40
5.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	41
5.5. EVALUACIÓN SOCIOAMBIENTAL	43
6- RESULTADOS Y DISCUSIONES	45
6.1 CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS	45
6.2 DEFINICIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR	47
6.3 CONSTRUCCION DEL BIODIGESTOR.....	47
6.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	48
6.5 EVALUACIÓN SOCIOAMBIENTAL.....	53

7- CONSIDERACIONES FINALES	60
8- RECOMENDACIONES	62
9- BIBLIOGRAFÍA.....	63
10- ANEXOS	66
ANEXO I - ENCUESTA A POBLADORES.....	66

1-INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de fuentes de energía renovable es esencial para enfrentar los desafíos ambientales, económicos y sociales derivados del uso de combustibles fósiles. Entre las tecnologías más prometedoras se encuentra la producción de biogás, que permite transformar residuos orgánicos en energía limpia y sostenible, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y a una gestión eficiente de desechos, especialmente en comunidades rurales e industriales.

Paraguay cuenta con una matriz energética diversificada, en la cual la hidroenergía representa el 57% de la oferta energética primaria, proveniente principalmente de las centrales hidroeléctricas de Itaipú, Yacyretá y Acaray. La biomasa constituye el 27%, siendo utilizada principalmente en el sector industrial, mientras que el 16% restante corresponde a hidrocarburos importados, lo que evidencia una alta dependencia externa en este rubro (Paraguay, 2024). A pesar del potencial de la biomasa, su explotación genera problemas de sostenibilidad, como la deforestación. En este contexto, el biogás surge como una alternativa viable que no solo diversifica la matriz energética, sino que también reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y genera subproductos como el digestato, un fertilizante orgánico (Dos Santos Miranda, Van der Krogt; Portillo, 2020).

Paraguay, con una economía basada en la agricultura y la ganadería, cuenta con una alta disponibilidad de residuos orgánicos provenientes del cultivo de soja, maíz y trigo, así como de la producción pecuaria. Sin embargo, la implementación de sistemas de biogás aún es limitada y carece de una estructura sólida de información y experiencia técnica (Dos Santos Miranda, Van der Krogt; Portillo, 2020; Lovera, 2011).

Así, este trabajo propone el diseño integral de un sistema de producción de biogás para la comunidad de Torin, en el distrito de Dr. Juan Eulogio Estigarribia, Caaguazú, abarcando tanto la planificación del sistema como el dimensionamiento técnico del biodigestor, considerando la caracterización de los residuos orgánicos disponibles y las condiciones operacionales necesarias para garantizar su eficiencia. Además, se evaluará la viabilidad económica del sistema y sus posibles beneficios sociales y ambientales para la comunidad. La iniciativa busca optimizar la gestión de residuos y mejorar la calidad de vida de los habitantes mediante una solución sostenible y replicable en contextos similares.

Desde el enfoque de la ingeniería química, este estudio se sitúa en la intersección entre energía renovable y gestión ambiental. Su objetivo es analizar la viabilidad técnica y social del sistema, abarcando desde la evaluación de materias primas hasta el impacto

socioambiental de su implementación.

Esta investigación pretende proporcionar una solución integral a la problemática energética y de gestión de residuos en Torin, ofreciendo un modelo viable - el biodigestor artesanal de tambor plástico de 200 L - desde el punto de vista técnico, económico y social, que pueda ser replicado en otras comunidades rurales.

2- OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar un sistema de producción de biogás para la comunidad de Torin, en el distrito de Dr. Juan Eulogio Estigarribia, Caaguazú, mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos locales, considerando su viabilidad técnica, económica y social.

Objetivos Específicos

1. Identificar y caracterizar los residuos orgánicos disponibles en la comunidad, determinando su potencial de aprovechamiento para la producción de biogás.
2. Dimensionar el sistema de biodigestión anaerobia, considerando factores como el volumen necesario, tiempo de retención y eficiencia en la conversión de materia orgánica en biogás.
3. Evaluar los costos de implementación y operación del sistema de biogás, considerando su viabilidad económica.
4. Determinar los impactos sociales y ambientales del sistema de biogás, proponiendo estrategias para su aceptación y uso sostenible en la comunidad.

3- JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de sistemas sostenibles de producción de energía, como el biogás, representa una solución integral frente a los desafíos sociales, económicos y ambientales que enfrentan comunidades rurales e industriales. En el caso específico de la comunidad de Torin, ubicada en Dr. Juan Eulogio Estigarribia, Caaguazú, Paraguay, existe una creciente necesidad de alternativas energéticas que reduzcan la dependencia de fuentes convencionales y fomenten el aprovechamiento eficiente de los residuos orgánicos generados localmente.

A pesar del potencial del biogás como fuente renovable, su implementación en Paraguay sigue siendo incipiente. La falta de estudios específicos sobre su aplicabilidad en comunidades rurales constituye una laguna en la investigación científica, lo que dificulta la toma de decisiones fundamentadas para su adopción (Dos Santos Miranda, Van der Krogt; Portillo, 2020). Además, la ausencia de políticas públicas que impulsen su desarrollo limita su expansión (Lovera, 2011).

La innovación de este estudio radica en el diseño y adaptación de un sistema de biogás específico para la comunidad de Torin, considerando sus características socioeconómicas y ambientales. Se propone una solución energética sostenible que aprovecha residuos locales y minimiza impactos negativos, integrándose a las actividades productivas de la región. Además, este estudio busca generar conocimiento técnico y económico que pueda servir como base para futuras investigaciones y proyectos de implementación del biogás en Paraguay.

La implementación de un sistema de producción de biogás tiene el potencial de mejorar significativamente la calidad de vida de los habitantes, al proporcionarles acceso a una fuente de energía limpia y sostenible. Además, el uso de biogás contribuye a la reducción de enfermedades relacionadas con la quema de leña y el manejo inadecuado de residuos, beneficiando tanto la salud pública como el bienestar general de la comunidad.

Si bien el enfoque principal de este estudio no se centra en la generación de ingresos, el uso de biogás puede reducir los costos asociados con el consumo de combustibles tradicionales y fertilizantes, al aprovechar subproductos como el biol. Esto puede traducirse en un ahorro significativo para las familias e industrias locales.

El proyecto también responde a la necesidad urgente de mitigar el impacto ambiental generado por la acumulación y descomposición inadecuada de residuos orgánicos; al transformar estos residuos en energía útil, el sistema propuesto reduce las emisiones de

gases de efecto invernadero y contribuye a una gestión más eficiente de los recursos naturales.

Este trabajo representa una contribución al diseño y optimización de sistemas de biogás adaptados a contextos específicos. La experiencia adquirida puede servir de modelo para otras comunidades similares en la región y dentro del país, ampliando el impacto del estudio más allá de la localidad en cuestión.

4- REVISIÓN TEÓRICA

4.1. CONTEXTO TERRITORIAL Y SOCIOECONÓMICO

4.1.1. Departamento De Caaguazú

El departamento de Caaguazú se encuentra ubicado en la región oriental del Paraguay, como muestra la Figura 1, y es considerado uno de los polos productivos más importantes del país. Según datos del Censo Nacional de Población y Viviendas 2022, cuenta con una población de aproximadamente 430.142 habitantes, representando el 7% de la población nacional. Su capital es la ciudad de Coronel Oviedo y está dividido en 22 distritos.

Figura 1 - Localización Geográfica del Departamento de Caaguazú



Fuente: Google Earth

Caaguazú posee una economía dinámica, sustentada principalmente en la producción agrícola y ganadera, complementada con el desarrollo industrial y comercial. Es el segundo departamento con mayor cantidad de fincas agropecuarias y ocupa un lugar destacado en la producción de cultivos como caña de azúcar, soja, maíz, mandioca y trigo. En el ámbito ganadero, es el sexto departamento con mayor producción nacional, con predominio del ganado vacuno, pero también se crían ovinos, caprinos, porcinos, equinos.

La población de Caaguazú se caracteriza por su diversidad cultural, conformada por

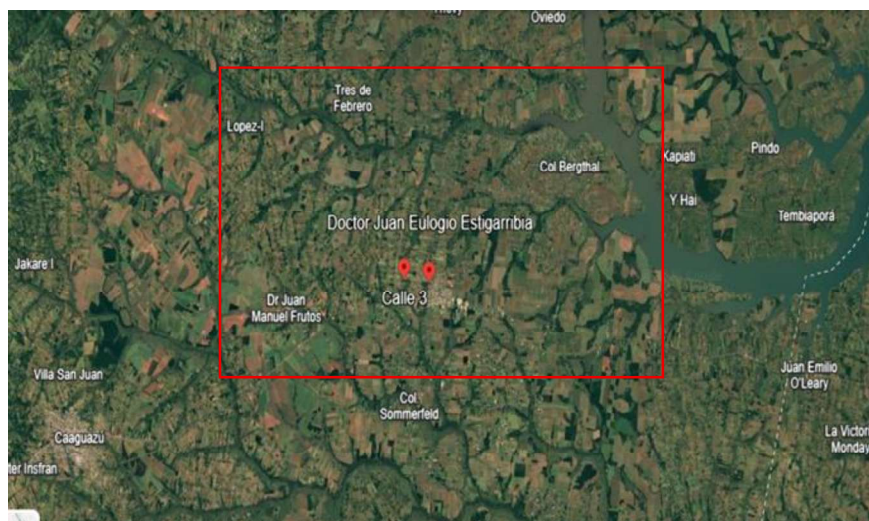
comunidades paraguayas, pueblos originarios y descendientes de inmigrantes, principalmente menonitas y brasileños. Aproximadamente el 56,5% de la población vive en zonas rurales, lo que refleja la importancia del sector agropecuario en la economía local.

La combinación de una población mayoritariamente rural y una base económica centrada en la agricultura y ganadería hace que la generación de residuos orgánicos sea significativa, lo que representa una oportunidad ideal para proyectos sostenibles como la producción de biogás.

4.1.2. Distrito Dr. Juan Eulogio Estigarribia

El distrito de Dr. Juan Eulogio Estigarribia, conocido popularmente como Campo 9, forma parte del departamento de Caaguazú. Es un importante centro agroindustrial del país, reconocido por su producción y procesamiento de leche, harinas, almidón y otros productos agrícolas. Tiene una población aproximada de 40.000 habitantes y está situado a 213 km de Asunción y a 115 km de Ciudad del Este, sobre la Ruta Internacional N° 7. La Figura 2 presenta la localización geográfica Distrito de Dr. Juan E. Estigarribia.

Figura 2 - Localización Geográfica del Distrito de Dr. Juan E. Estigarribia



Fuente: Google Earth

La historia del distrito es rica en multiculturalidad, con presencia de comunidades menonitas, paraguayas, brasileñas, norteamericanas e indígenas. Este entorno multicultural ha favorecido el desarrollo económico, combinando la agricultura mecanizada

a gran escala, liderada principalmente por las colonias menonitas, con la agricultura familiar practicada por productores paraguayos.

Las principales actividades económicas incluyen la producción agrícola de soja, trigo, maíz, mandioca, girasol y otros cultivos. Además, posee una destacada industria láctea liderada por la Cooperativa Lactolanda, que procesa más de 800.000 litros de leche diarios, y múltiples molinos y agroindustrias que procesan los productos agrícolas de la región.

Este desarrollo económico ha permitido que el distrito tenga una infraestructura avanzada, pero al mismo tiempo conserva comunidades rurales donde persisten desafíos en la gestión de residuos orgánicos, lo que abre la posibilidad de soluciones sostenibles como la producción de biogás.

4.1.3. Comunidad De Torin

La comunidad de Torin se encuentra dentro del distrito de Dr. Juan Eulogio Estigarribia, situada entre los kilómetros 222 y 240 de la Ruta PY 02 (Figura 3). Es una localidad con fuerte identidad cultural, cuyo nombre proviene de una antigua leyenda guaraní relacionada con un cacique que amaba a los toros y nombró a su hijo "Torin".

Fundada en la década de 1960, Torin es una comunidad rural donde la agricultura y la ganadería de pequeña escala constituyen las principales actividades económicas. Las familias locales se dedican principalmente al cultivo de maíz, mandioca, batata, maní, sandía, zapallo y otros productos agrícolas de subsistencia, así como a la cría de animales como bovinos, porcinos y aves de corral para consumo propio y comercialización a pequeña escala.

A pesar de su cercanía con el centro industrial de Campo 9, la comunidad mantiene características rurales con limitaciones en el acceso a energía sostenible y en la gestión adecuada de residuos orgánicos. Este contexto hace que Torin sea un lugar propicio para la implementación de un sistema de biodigestión anaeróbica, que permita transformar residuos agropecuarios en biogás y fertilizantes orgánicos, generando beneficios económicos, ambientales y sociales para sus habitantes.

Figura 3 - Localización Geográfica de la Comunidad de Torin



Fuente: Google Earth

4.2. BIOGÁS

4.2.1. Introducción

La producción de biogás, basada en el aprovechamiento de residuos orgánicos, se ha consolidado como una tecnología clave para enfrentar los retos ambientales, sociales y energéticos. Este capítulo revisa los fundamentos técnicos, aplicaciones prácticas y beneficios del biogás, así como estudios de caso que demuestran su viabilidad en diversos contextos. Además, se destacan las oportunidades y desafíos de esta tecnología en Paraguay y América Latina.

4.2.2. Fundamentos Del Biogás, Producción Y Etapas De La Digestión Anaeróbica

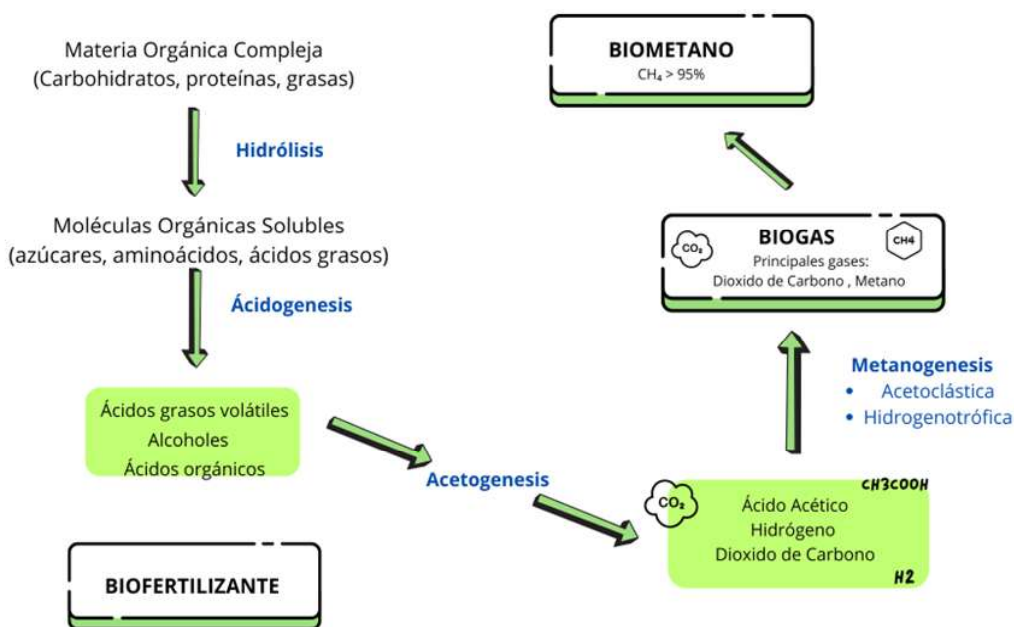
El biogás es una mezcla combustible de gases, compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), generada mediante la digestión anaeróbica de materia orgánica por microorganismos en ausencia de oxígeno (FAO, 2011). En la Tabla 1 puede ser vista la composición típica de una muestra de biogás.

Tabla 1 - Composición química del biogás

Componente	Fórmula	%Composición
Metano	CH ₄	40-70
Dióxido de Carbono	CO ₂	30-60
Hidrógeno	H ₂	0,1
Nitrógeno	N ₂	0,5
Monóxido de Carbono	CO	0,1
Oxígeno	O ₂	0,1

Fuente: Blanco *et al.* (2012)

La digestión anaeróbica incluye cuatro etapas clave: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, donde el contenido de metano determina el poder calorífico del gas (Lamo Anuarbe, 2011). En la Figura 4 se puede observar las etapas de la digestión anaeróbica. A continuación, son presentadas las etapas de la digestión anaeróbica.

Figura 4 - Esquema de la Digestión Anaeróbica

Fuente: El autor, 2025

a) Hidrólisis:

En esta primera etapa, los polímeros complejos (carbohidratos, proteínas y lípidos) se descomponen en moléculas más simples como monosacáridos, aminoácidos y ácidos

grasos mediante enzimas hidrolíticas. Esta fase es frecuentemente la más lenta del proceso y, por tanto, determina la velocidad general de la producción de biogás (Dos Santos *et al.*, 2019).

b) Acidogénesis:

Los productos simples de la hidrólisis se convierten en ácidos grasos volátiles (como propionato y butirato), dióxido de carbono y pequeñas cantidades de hidrógeno. Durante esta etapa, el pH del sistema puede descender, lo que afecta la actividad de las bacterias metanogénicas si no se regula adecuadamente (Dos Santos *et al.*, 2019).

c) Acetogénesis:

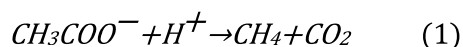
En esta etapa, los ácidos grasos volátiles se transforman en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, que sirven como precursores para la formación de metano. La cooperación entre bacterias acetogénicas y metanogénicas es clave para el equilibrio del proceso (Dos Santos *et al.*, 2019).

d) Metanogénesis:

En la última etapa, las arqueas metanogénicas convierten el hidrógeno y el acetato en metano y dióxido de carbono. Este paso es altamente sensible a factores como temperatura y pH, y su eficiencia determina la cantidad y calidad del biogás producido (Dos Santos *et al.*, 2019). Según Chen *et al.* (2008), el proceso de metanogénesis es altamente sensible a las condiciones ambientales, como el pH y la temperatura, lo que determina la eficiencia del biodigestor.

En el proceso de digestión anaeróbica, el metano se produce a través de dos principales rutas metabólicas:

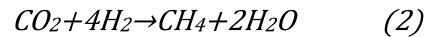
1. **Metanogénesis Acetoclástica:** En esta ruta, las arqueas metanogénicas transforman el acetato en metano y dióxido de carbono. Esta vía representa aproximadamente el 70% de la producción total de metano en condiciones normales. La reacción química es:



Las arqueas responsables incluyen especies del género *Methanosaeta*.

2. **Metanogénesis Hidrogenotrófica:** En esta ruta, el metano se genera mediante la reducción de dióxido de carbono con hidrógeno molecular. Este proceso también

juega un papel crítico en el equilibrio termodinámico del sistema al eliminar el exceso de H_2 , permitiendo que las bacterias acetogénicas continúen operando eficientemente. La reacción química es:



Este camino es mediado por arqueas como las del género *Methanobacterium*.

Estas dos rutas son complementarias y esenciales para maximizar la producción de metano en biodigestores. La distribución de estas rutas depende de factores como la disponibilidad de sustratos, el pH, y la temperatura del sistema (Vargas, 2020).

Además de generar energía, la biodigestión anaeróbica permite obtener subproductos como el digestato, un fertilizante orgánico rico en nitrógeno, fósforo y potasio, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles (FAO, 2011). Esto lo convierte en una solución integral que promueve la sostenibilidad en sistemas agrícolas y rurales (Dos Santos *et al.*, 2019).

4.2.3. Parámetros Que Interfieren En La Biodigestión

La eficiencia del proceso de digestión anaeróbica depende en gran medida del control de diversos parámetros que afectan directamente la actividad metabólica de las bacterias y arqueas involucradas. Entre los factores más relevantes se encuentran el pH, la temperatura y la relación carbono/nitrógeno (C/N), los cuales son determinantes para garantizar una producción óptima de biogás.

a) pH en la digestión anaeróbica

El pH óptimo para el proceso varía según las etapas de la digestión:

- Durante la hidrólisis y acidogénesis, el pH ideal oscila entre 5,5 y 6,5, ya que la producción de ácidos orgánicos puede disminuir significativamente el pH si no se controla adecuadamente.
- En las etapas de acetogénesis y metanogénesis, se requiere un pH más cercano a la neutralidad, entre 6,8 y 7,5, para garantizar la actividad de las arqueas

metanogénicas, especialmente las metanogénicas acetoclásticas ((VAPSBDDGIRÁS; ARC, 2013)).

Las desviaciones significativas de estos rangos pueden inhibir el proceso, generando acumulación de ácidos grasos volátiles y disminuyendo la producción de biogás.

b) Temperatura en la Digestión Anaeróbica

La temperatura es otro factor crítico, ya que influye en la velocidad de las reacciones bioquímicas y en la actividad de los microorganismos. Se pueden distinguir tres rangos principales:

- **Rango Psicofílico (10-20 °C):** Se observa una actividad limitada y tasas de producción bajas, siendo común en climas fríos.
- **Rango Mesofílico (35-40 °C):** Es el más común en biodigestores, con una actividad óptima de las arqueas metanogénicas.
- **Rango Termofílico (50-60 °C):** Permite una mayor velocidad de digestión, pero es más sensible a fluctuaciones de temperatura y requiere mayor control (CIAP, 2015).

El mantenimiento de una temperatura estable es esencial, ya que las variaciones abruptas pueden alterar el equilibrio microbiano y afectar negativamente la producción de biogás.

c) Relación Carbono/Nitrógeno

Una de las variables clave en el proceso de biodigestión es la relación entre carbono (C) y nitrógeno (N) de los residuos orgánicos, ya que influye directamente en la actividad de los microorganismos encargados de descomponer la materia orgánica.

Los microorganismos que realizan la digestión anaeróbica requieren una cantidad equilibrada de carbono y nitrógeno para su crecimiento y metabolismo. Una relación C/N óptima se encuentra típicamente entre 20:1 y 30:1, lo que garantiza que los microorganismos tengan suficiente carbono para producir energía y suficiente nitrógeno para la síntesis de proteínas y crecimiento celular (FAO, 2019).

- Si la relación C/N es demasiado alta (por ejemplo, residuos con exceso de carbono, como residuos de madera o paja), los microorganismos no tienen suficiente

nitrógeno para descomponer el carbono, lo que reduce la eficiencia de la digestión y la producción de biogás.

- Si la relación C/N es demasiado baja (por ejemplo, residuos con exceso de nitrógeno, como estiércol fresco), puede producirse una acumulación de amoníaco, que es tóxico para los microorganismos y también reduce la eficiencia del proceso.

Por lo tanto, la correcta caracterización de los residuos y el ajuste de la relación C/N son esenciales para asegurar una digestión anaeróbica eficiente y la maximización de la producción de biogás (FAO, 2019).

4.2.4. Usos Y Aplicaciones Del Biogás

El biogás tiene múltiples aplicaciones energéticas y ambientales. El gas se utiliza para generar electricidad, calor y biometano, mientras que el digestato se aprovecha como fertilizante (Lamo Anuarbe, 2011). Además, contribuye a la gestión adecuada de residuos, mitigando la contaminación de suelos y aguas.

En Cantabria, España, un proyecto que utiliza estiércol bovino demostró una reducción significativa de emisiones de metano y ahorros energéticos en ganaderías intensivas. Por su parte, iniciativas en Colombia han demostrado la eficiencia de biodigestores pequeños para suplir necesidades domésticas (Lamo Anuarbe, 2011; FAO, 2011).

Algunas aplicaciones son:

1. Producción de calor o vapor

El uso más simple del biogás es para generar calor o vapor. Los sistemas pequeños pueden proporcionar energía calórica para cocinar, calentar agua e incluso iluminación básica. Este tipo de aplicaciones es fundamental en comunidades rurales donde el acceso a otras fuentes de energía es limitado (Vargas, 2020).

2. Generación de electricidad o cogeneración

El biogás puede emplearse en sistemas combinados de calor y electricidad. Estos sistemas aprovechan la electricidad generada por el combustible y el calor residual. Existen turbinas de gas y motores de combustión interna específicamente diseñados para esta función, destacando su eficiencia energética. Este enfoque aumenta significativamente la

eficiencia del proceso al combinar electricidad y calor residual, comparado con el uso exclusivo del biogás para una sola aplicación (Vargas, 2020).

3. Combustible para vehículos

El biogás también puede ser usado como combustible en motores de combustión interna adaptados para gasolina o diésel. Este gas tiene un alto octanaje, entre 100 y 110, lo que lo hace ideal para motores de alta relación de compresión. Sin embargo, su baja velocidad de encendido y la falta de infraestructura adecuada limitan su aplicación masiva (Vargas, 2020).

Sin embargo, para su uso vehicular es crucial un proceso previo de purificación que elimina impurezas como el dióxido de carbono (CO_2), el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el agua. Este biogás purificado se convierte en biometano, un combustible equivalente al gas natural, con aplicaciones en el transporte urbano e industrial. La purificación mejora el poder calorífico del gas y reduce los daños a los motores, alargando su vida útil y aumentando la eficiencia (Vargas, 2020). Además, su uso como combustible vehicular representa una alternativa sostenible para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente en flotas urbanas de autobuses y camiones, donde el biometano puede reemplazar el diésel y otros combustibles fósiles.

Según Dos Santos Miranda *et al.* (2020), el biogás puede sustituir al diésel en maquinaria agrícola, reduciendo costos operativos y dependencia de hidrocarburos importados.

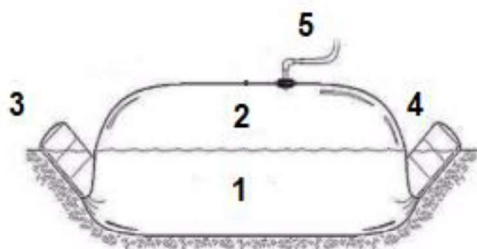
4.3. BIODIGESTORES

4.3.1. Fundamentos

Un biodigestor es un sistema cerrado que permite la digestión anaeróbica de materia orgánica, generando biogás y biofertilizante. El biogás contiene principalmente metano (CH_4), un gas altamente energético, y dióxido de carbono (CO_2), mientras que el biofertilizante es rico en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, útiles para la agricultura. Los biodigestores se utilizan ampliamente para el tratamiento de residuos

agrícolas, industriales y urbanos, permitiendo la gestión eficiente de desechos y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental (Ramos *et al.*, 2021; Gonçalves *et al.*, 2018). A continuación, en la Figura 5 se presenta un esquema de los componentes de un biodigestor.

Figura 5 - Componentes de un Biodigestor



Fuente: UNA, FCA 2012

Componentes principales:

- 1- Cámara de digestión: Zona donde ocurre la fermentación anaeróbica.
- 2- Gasómetro: Depósito que almacena el biogás producido.
- 3- Sistemas de entrada: Conducen la biomasa al biodigestor
- 4- Sistema de salida: conduce el biofertilizante hacia su uso final
- 5- Salida de gas: conduce el biogás para su almacenamiento (Araújo *et al.*, 2015).

4.3.2. Modelos De Biodigestores

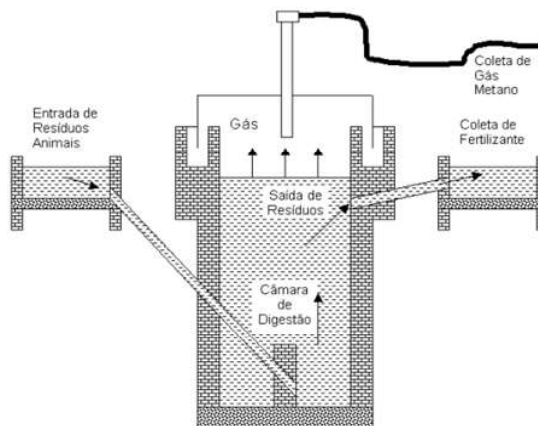
Los biodigestores son tecnologías claves para la conversión de residuos orgánicos en biogás y biofertilizantes, ofreciendo una solución sostenible para la gestión de desechos y la producción de energía renovable. La elección del modelo adecuado de biodigestor depende de varios factores, como el clima de la región, el tipo de materia orgánica disponible, la cantidad de material generado y la infraestructura local. Entre los modelos más comunes se encuentran el biodigestor indio, caracterizado por su robustez y eficiencia; el modelo chino, conocido por su diseño sencillo y bajo costo; el batelada, ideal para proyectos de pequeña escala; y el canadiense, particularmente efectivo en climas fríos. Cada uno de estos modelos tiene características que los hacen adecuados para distintos

contextos, lo que permite maximizar la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica y los beneficios derivados (FAO, 2019).

4.3.2.1- Biodigestor Indiano

Este modelo consta de una cámara de digestión cilíndrica o semiesférica y una campana flotante que actúa como gasómetro. Fue desarrollado en la India para el manejo de estiércol bovino y residuos agrícolas. El esquema de un biodigestor indiano se muestra en la Figura 6.

Figura 6 - Esquema de un Biodigestor Indiano



Fuente: Da Cunha; Rein, 2008

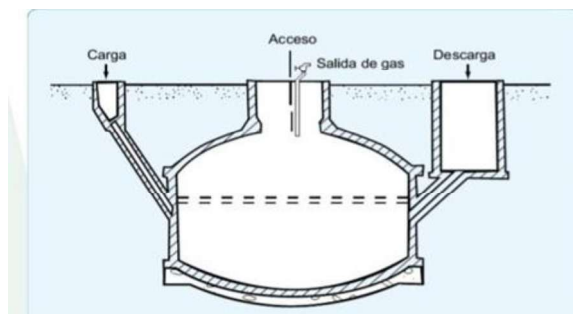
- **Funcionamiento:** Continuo. Los residuos ingresan diariamente, y el gas se recolecta en la campana, cuya altura varía según el volumen de gas almacenado.
- **Ventajas:** Fácil de operar, construcción sencilla, y adecuado para pequeños agricultores.
- **Desventajas:** Mayor costo inicial debido al material metálico de la campana flotante, que puede corroerse con el tiempo (Araújo *et al.*, 2015).

4.3.2.2- Biodigestor Chino

Este modelo está basado en una estructura fija, generalmente construida en ladrillo

o concreto, y es uno de los diseños más difundidos en zonas rurales de China. La Figura 7 nos muestra un esquema de un biodigestor chino.

Figura 7 - Esquema de un Biodigestor Chino



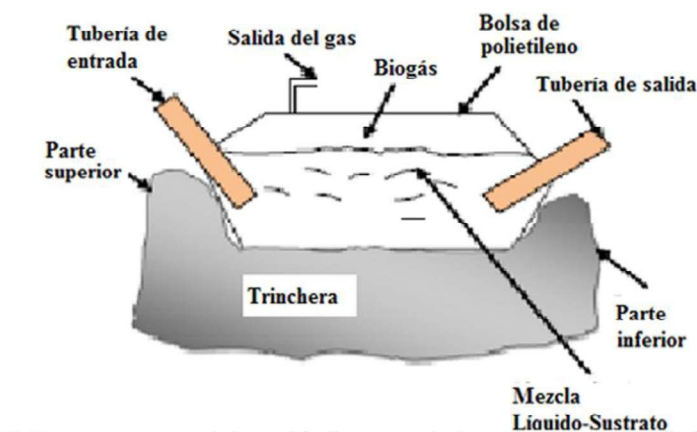
Fuente: SLIDESERVE., 2014

- **Funcionamiento:** Continuo o por lotes. Los residuos se cargan en intervalos regulares y el gas se almacena en una cúpula fija integrada.
- **Ventajas:** Bajo costo de mantenimiento debido a la durabilidad del material, ideal para climas cálidos.
- **Desventajas:** Requiere un diseño adecuado para evitar fugas de gas y filtraciones de agua (Gonçalves *et al.*, 2018).

4.3.2.3- Biodigestor Canadiense (tubular)

Diseñado con materiales plásticos como PVC, es un modelo tubular flexible que se utiliza ampliamente en América Latina. El esquema de un biodigestor canadiense puede ser observado en la Figura 8.

Figura 8 - Biodigestor Tubular



Fuente: Barrera-Cardoso *et al.* (2020)

- **Funcionamiento:** Continuo. Los residuos y el agua se mezclan antes de ser introducidos en el biodigestor, y el biogás se recolecta en la misma estructura tubular.
- **Ventajas:** Bajo costo de construcción, instalación rápida y fácil transporte.
- **Desventajas:** Menor durabilidad en comparación con los modelos de ladrillo o concreto, y sensibilidad a daños mecánicos (Ramos *et al.*, 2021).

4.3.2.4- Biodigestor por lotes (Batelada)

Se utiliza principalmente para residuos sólidos o cargas irregulares de materia orgánica.

- **Funcionamiento:** Por lotes. El biodigestor se carga completamente y se sella hasta completar la digestión, que puede durar entre 20 y 60 días, dependiendo de las condiciones.
- **Ventajas:** Simplicidad operativa, ideal para residuos sólidos y zonas con cargas irregulares.
- **Desventajas:** No permite una producción continua de biogás, ya que se necesita tiempo de vaciado y limpieza entre ciclos (Araújo *et al.*, 2015; Gonçalves *et al.*, 2018).

Los biodigestores continuos permiten una producción constante de biogás y

biofertilizante, lo que los hace ideales para comunidades o instalaciones que generan residuos orgánicos de manera diaria. Este tipo de sistema asegura un flujo continuo de sustrato y biogás, lo que resulta en una operación eficiente y estable a largo plazo. Por otro lado, los biodigestores por lotes son más adecuados para proyectos experimentales o en contextos donde la cantidad de residuos orgánicos es baja o intermitente. En estos sistemas, el sustrato se carga en el biodigestor en un solo lote, y la digestión se realiza por un período determinado, lo que puede ser menos eficiente en términos de producción continua de biogás, pero útil para ciertos escenarios con menores volúmenes de residuos (FAO, 2019).

4.3.3. Dimensionamiento Del Biodigestor

El dimensionamiento de un biodigestor requiere considerar la cantidad de residuos disponibles, el tiempo de retención hidráulico (TRH) y la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica. Según Mata-Alvarez (2014), el diseño de un biodigestor eficiente debe considerar la carga orgánica diaria y la relación carbono-nitrógeno de los residuos.

Para determinar el volumen de un biodigestor se puede utilizar la ecuación (3).

$$Vb=Cd \times TRH \quad (3)$$

Donde:

Vb =es el volumen del biodigestor,

Cd =es el volumen de carga diaria y

TRH = tiempo de retención hidráulico (Araújo *et al.*, 2015).

La carga diaria se determina sumando el volumen de residuos y agua necesaria para la dilución. Por ejemplo, para estiércol bovino, la relación estiércol/agua suele ser de 1:1 (Gonçalves *et al.*, 2018). El TRH representa el tiempo promedio que un fluido (sustrato) permanece dentro de un sistema o reactor de tratamiento, como el biodigestor, y depende de la temperatura del entorno, afecta directamente la eficiencia de producción de biogás. En climas cálidos (>20°C), el TRH recomendado es de 20 a 40 días (Ramos *et al.*, 2021).

La geometría del biodigestor (cilíndrico o tubular) se adapta al volumen calculado, asegurando eficiencia y facilidad de construcción. Por ejemplo, un biodigestor tubular debe tener una relación óptima entre altura y diámetro para maximizar la fermentación y evitar pérdidas (Araújo *et al.*, 2015; Ramos *et al.*, 2021).

4.3.4. Impactos Sociales Y Ambientales

La implementación de sistemas de biogás genera beneficios sociales, como la mejora en la calidad de vida mediante el acceso a energía limpia, y ambientales, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Lamo Anuarbe, 2011). Además, disminuye la contaminación de suelos y acuíferos al evitar la disposición inadecuada de residuos (FAO, 2011). De acuerdo con Bond y Templeton (2011), los proyectos de biogás generan un impacto significativo en la salud pública al reducir el humo producido por la combustión de leña.

En comunidades rurales de América Latina, el biogás ha permitido disminuir la dependencia de combustibles fósiles, promoviendo una transición hacia modelos energéticos sostenibles (Lamo Anuarbe, 2011). Como señalan Bond y Templeton (2011), los sistemas de biogás en zonas rurales no solo reducen la dependencia de la leña, sino que también disminuyen la deforestación y las emisiones de gases de efecto invernadero.

4.3.5. Perspectivas Futuras Y Desafíos

Aunque el biogás ha mostrado ser una solución eficaz en diversas regiones, enfrenta desafíos técnicos y sociales. La falta de conocimiento sobre su operación y mantenimiento limita su replicabilidad en zonas rurales. Además, es necesario un mayor apoyo gubernamental para financiar proyectos y educar a las comunidades sobre sus beneficios (FAO, 2011).

En Paraguay, el potencial de aprovechamiento de residuos agrícolas y ganaderos representa una oportunidad única para expandir el uso del biogás, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética del país (Lamo Anuarbe, 2011).

5- METODOLOGÍA

La presente investigación combina diversos enfoques metodológicos para garantizar un análisis completo y detallado del diseño y dimensionamiento de un sistema de producción de biogás en la comunidad de Torin, Dr. Juan Eulogio Estigarribia, Caaguazú, Paraguay.

La metodología empleada en esta investigación se basa en un enfoque integral que combina aspectos técnicos, económicos y socioambientales. Se contempla desde la caracterización de residuos y el diseño del sistema hasta la evaluación de su viabilidad económica y social, garantizando un enfoque multidimensional que facilite la implementación exitosa del proyecto.

5.1. ANÁLISIS Y CUANTIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS

5.1.1. Caracterización Del Tipo De Residuo Y Cantidad Producida

Se realizó un estudio de campo para identificar las principales fuentes de residuos orgánicos. Consistió en la recolección y caracterización de residuos orgánicos domiciliarios en la comunidad de Torin, Dr. Juan Eulogio Estigarribia, Caaguazú. Se seleccionó una muestra intencional de 10 familias, representativas en cuanto a número de miembros y generación diaria de residuos.

Durante 8 días consecutivos, se recolectaron y pesaron los residuos generados en cada familia. El objetivo fue obtener datos reales sobre la cantidad y tipo de residuos orgánicos disponibles para su potencial uso en un biodigestor doméstico. Se calculó el promedio de generación por familia, que posteriormente sirvió como base para la estimación de carga diaria y para proyectar la aplicabilidad del sistema a una escala comunitaria (300 familias).

5.1.2. Caracterización De Residuos

Para la caracterización de los residuos que serán utilizados como sustrato para digestión anaerobia, se identificaron y evaluaron los siguientes parámetros clave: relación carbono/nitrógeno (C/N), porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV), contenido de cenizas, pH y potencial bioquímico de metano (PBM).

5.1.2.1. Relación C/N

La relación carbono/nitrógeno (C/N) fue determinada con base en datos de literatura técnica y científica, utilizando composiciones típicas de residuos similares al utilizado en este estudio. Este enfoque es apropiado en ausencia de análisis elementales directos (C, H, N, S) y permite una estimación confiable para evaluar la viabilidad del proceso biológico.

5.1.2.2. Porcentaje de Sólidos Totales, Sólidos Volátiles y Ceniza

Inicialmente, 3 cápsulas de porcelana vacías fueron colocadas en estufa a 105 ± 1 °C durante aproximadamente 2 horas, con el fin de eliminar cualquier traza de humedad. La cápsula fue enfriada en un desecador y luego pesada para obtener su masa inicial (m_0). Se adicionó en cada cápsula 1 g de muestra húmeda, y se registró la masa total (m_1). La cápsula con la muestra fue secada en estufa a 105 °C durante 17 horas. Luego de enfriar en desecador, se pesó nuevamente la cápsula con la muestra seca (m_2). Para calcular el porcentaje de sólidos totales (%ST) se utilizó la ecuación (4).

$$\%ST = \left[\frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \right] \cdot 100\% \quad (4)$$

Para la determinación de Sólidos Volátiles Totales (STV) y Cenizas se utilizó el residuo seco de la etapa anterior. La muestra fue llevada a una mufla a 550 °C durante 2 horas. Luego, se enfrió en desecador y se pesó para obtener la masa final (m_3). Para los cálculos de STV y cenizas se utilizaron las siguientes ecuaciones (5) y (6), respectivamente.

$$\%STV = \left[\frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_0} \right] \cdot 100\% \quad (5)$$

$$\%Cenizas = 100\% - \%STV \quad (6)$$

5.1.2.3. Potencial Bioquímico de Metano (PBM)

El Potencial Bioquímico de Metano (PBM) fue estimado con base en valores disponibles en la literatura especializada, considerando el tipo de residuo evaluado y su contenido de sólidos volátiles (STV). Estudios previos han demostrado que es posible asociar el contenido orgánico de un residuo con su capacidad de generar metano, proporcionando así una estimación inicial útil para el diseño y dimensionamiento de sistemas de digestión anaeróbica (Coello *et al.*, 2021; FAO, 2011; Alves, 2010).

Para la presente estimación, se adoptó una composición promedio del biogás generados por residuos orgánicos domiciliarios, con 60% de metano (CH_4), valor comúnmente reportado para residuos biodegradables frescos. A partir del volumen total de biogás estimado por familia, se calculó el volumen de CH_4 producido mediante la siguiente ecuación (7).

$$V_{\text{CH}_4} = V_{\text{biogás}} \times \% \text{CH}_4 \quad (7)$$

Donde:

V_{CH_4} = volumen de metano generado ($\text{m}^3/\text{día}$)

$V_{\text{biogás}}$ = volumen total de biogás estimado ($\text{m}^3/\text{día}$)

$\% \text{CH}_4$ = fracción de metano en el biogás (adimensional)

Luego, se calculó la energía útil generada por el metano utilizando su poder calorífico inferior (PCI), según la ecuación (8).

$$E_{\text{CH}_4} = V_{\text{CH}_4} \times \text{PCI}_{\text{CH}_4} \quad (8)$$

Donde:

E_{CH_4} = energía útil generada ($\text{kWh}/\text{día}$)

PCI_{CH_4} = poder calorífico inferior del metano ($9,97 \text{ kWh}/\text{m}^3$) (Perry et al., 2008; Engineering Toolbox, 2020).

Este enfoque permitió una estimación energética más precisa, y validó el uso de un PCI promedio del biogás de $6 \text{ kWh}/\text{m}^3$, ampliamente adoptado para mezclas típicas con 55–60% de metano (FAO, 2011).

5.2. DEFINICIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR

La selección del biodigestor se basó en las condiciones socioeconómicas y técnicas de la comunidad de Torin, así como en la disponibilidad de materiales. El modelo elegido fue el biodigestor clásico de tambor plástico de 200 L (modelo artesanal), recomendado por

su bajo costo, facilidad de construcción y mantenimiento.

Este tipo de sistema ya ha sido validado en zonas rurales de América Latina (FAO, 2011; Ramos *et al.*, 2021) y se adapta perfectamente al uso doméstico o comunitario en pequeña escala. Además, permite ser replicado por la propia comunidad utilizando materiales accesibles.

5.3. CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR

El prototipo del biodigestor fue construido siguiendo el modelo clásico artesanal. El objetivo fue diseñar un sistema funcional, económico y replicable, capaz de servir como referencia técnica para futuras implementaciones domésticas.

El proceso comenzó con la preparación de un tambor plástico reciclado de 200 litros, el cual fue cuidadosamente lavado y revisado para detectar posibles grietas o imperfecciones. Este tambor sirve como cámara principal donde ocurrirá la digestión anaeróbica.

Para la entrada del sustrato se realizó una perforación de 100 mm en la parte superior del tambor, donde se instaló un tubo de PVC de 100 mm de diámetro y 1,5 m de longitud, que funcionará como conducto para la entrada de residuos orgánicos. La base del tubo fue modificada con cortes en forma de "V" para facilitar el paso del sustrato y evitar obstrucciones. Para fijar el tubo, se utilizó una tapa CAP de PVC, que contaba con una goma de seguridad interna, la cual permite un cierre más hermético y seguro, evitando posibles fugas de gas o líquidos, sellada con cola PVC y pasta selladora, asegurando una unión hermética.

En la parte lateral del tambor, a aproximadamente 70 cm desde la base, se perforó un orificio de 50 mm. Se instaló una curva de PVC de 90° orientada hacia abajo en el interior del tambor, conectada externamente a un tubo de PVC de 50 mm con una válvula de paso. Esta salida permite el drenaje del digestato líquido, que podrá ser utilizado posteriormente como fertilizante. La unión fue sellada con los mismos materiales para evitar fugas.

Cerca de la entrada del sustrato, se perforó otro orificio de aproximadamente 20 mm en la parte superior del tambor para instalar la salida de biogás. Se conectó una válvula de paso pequeña a una manguera de goma, la cual lleva el gas hacia un filtro de H₂S artesanal.

El filtro fue construido con tubo de PVC de 50 mm con una longitud de aproximadamente 35 cm, rellena con esponja de acero nueva, la cual actuará como agente reductor del sulfuro de hidrógeno (H₂S) presente en el biogás. La entrada y salida del gas

en el filtro se realizaron mediante conectores plásticos de manguera, con uniones de 20 cm, fijados y sellados con cinta teflón y pegamento para PVC.

Desde el filtro, la manguera continúa hacia una bolsa plástica reforzada o balón de recolección, donde el biogás es almacenado para su medición o uso posterior. Todo el sistema fue ajustado con abrazaderas metálicas para asegurar un cierre eficiente y evitar pérdidas de presión.

El manual detallado del montaje se encuentra en el Anexo II.

Todos los componentes fueron ensamblados utilizando herramientas básicas como taladro eléctrico, sierra copa, tijeras para PVC y lija. Las uniones fueron reforzadas con cinta de teflón donde fue necesario.

El tiempo estimado de construcción fue de aproximadamente 2 días, contando el tiempo de curado de los sellantes. El sistema completo está diseñado para operar de manera sencilla, sin necesidad de electricidad o bombas externas. Si bien el prototipo no fue operado durante este estudio debido a las condiciones climáticas invernales, su construcción permitió:

- Estimar el costo real de implementación
- Demostrar que el diseño es reproducible en hogares de la comunidad

El prototipo se mantiene disponible para operación en condiciones climáticas más adecuadas, y representa una herramienta pedagógica y técnica para proyectos futuros de desarrollo comunitario sostenible.

5.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

5.4.1. Análisis De Costos De Inversión, Operación Y Mantenimiento

Con el objetivo de evaluar la viabilidad económica del sistema propuesto, se realizó un análisis detallado de los costos involucrados en la construcción y posible operación del prototipo de biodigestor. Este análisis se basó en los siguientes componentes:

- **Costo de inversión inicial (CI):** incluye la adquisición de materiales (tambor plástico, válvulas, tubos, sellantes, mangueras, etc.) y la mano de obra utilizada para el montaje.
- **Costos de operación (CO):** contemplan el tiempo estimado que se requeriría para la carga y descarga del sistema, en caso de funcionamiento, así como la frecuencia de uso esperada.

- **Costos de mantenimiento anual (CM):** consideran la necesidad de limpieza, revisión y posible reposición de válvulas o *conexiones*, con base en experiencias reportadas en la literatura (Araújo *et al.*, 2015; Ramos *et al.*, 2021).

Se utilizó la siguiente ecuación (9) para estimar el costo total del sistema.

$$C_{total} = CI + \sum_{i=1}^n (CO_i + CM_i) \quad (9)$$

Para el análisis económico, los costos de construcción del prototipo del biodigestor fueron inicialmente registrados en guaraníes paraguayos (Gs). Sin embargo, con el fin de facilitar la comprensión, la comparación internacional y la estandarización de los resultados, se optó por convertir los valores a dólares estadounidenses (USD), moneda de referencia universal en estudios técnicos y económicos.

La conversión fue realizada utilizando la tasa de cambio oficial del Banco Central del Paraguay, correspondiente al día 18 de julio de 2025, fecha en la cual se efectuaron los cálculos. La cotización fue de 1 USD = 7.350 Gs. Los valores presentados en esta investigación se expresan en dólares estadounidenses tomando como base dicha cotización.

5.4.2. Proyección De Ahorro Energético Y Beneficios Económicos Derivados Del Uso Del Biogás

La estimación del potencial de ahorro energético se basó en los datos recolectados durante la caracterización de residuos, así como en referencias técnicas como FAO (2011), Dos Santos Miranda *et al.* (2020) y Coello *et al.* (2021).

El cálculo del ahorro económico se realizó considerando:

- **El poder calorífico del biogás (PCI):** estimado en 6 kWh/m³ (FAO, 2011). Este valor corresponde a una conversión aproximada de 21,6 MJ/m³ (1 kWh = 3,6 MJ), considerando un biogás con 60% de metano.
- **La equivalencia energética con GLP:** considerando que 1 kg de GLP equivale a 13 kWh (FAO, 2011).
- **El precio local del GLP (Gs/kg):** obtenido de mercados regionales.

Las ecuaciones aplicadas (ecuaciones 10 – 14) fueron.

$$E_{útil} = V_{biogás} \cdot PCI_{biogás} \quad (10)$$

$$GLP_{eq} = \frac{E_{\acute{u}til}}{PCI_{GLP}} \quad (11)$$

$$Ahorro_{diario} = GLP_{eq} \cdot C_{GLP} \quad (12)$$

$$Ahorro_{mensual} = Ahorro_{diario} \cdot 30 \quad (13)$$

$$Ahorro_{comunidad} = Ahorro_{mensual} \cdot N_{familias} \quad (14)$$

Donde:

$V_{biog\acute{a}s}$ = volumen del biogás estimado (m³/día).

$PCI_{biog\acute{a}s}$ = poder calorífico del biogás (6 kWh/m³)

PCI_{GLP} = poder calorífico del GLP (13 kWh/kg)

C_{GLP} = precio del GLP (Gs/kg)

$N_{familias}$ = total de familias en la comunidad (300)

Estos cálculos permitieron proyectar los beneficios económicos diarios, mensuales y anuales para una familia y para la comunidad completa (300 familias), en caso de implementación del sistema.

5.5. EVALUACIÓN SOCIOAMBIENTAL

5.5.1. Entrevistas Para Evaluación Sobre La Percepción Del Sistema

Con el fin de evaluar la aceptación social del sistema de biodigestión propuesto, se elaboró y aplicó un cuestionario estructurado a una muestra de 10 familias de la comunidad.

Las encuestas incluyeron preguntas relacionadas con:

- Conocimiento previo sobre el biogás y biodigestores
- Opinión sobre el uso de residuos orgánicos para generación de energía
- Disposición a utilizar el sistema en el hogar
- Percepciones sobre beneficios ambientales y posibles preocupaciones

5.5.2. Análisis De Beneficios Ambientales

Dado que el prototipo no fue operado, el análisis de beneficios ambientales se basó en datos de estudios previos sobre biodigestores similares en contextos rurales. Se consideraron los siguientes aspectos:

- Reducción de residuos orgánicos en vertederos

- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI): según FAO (2011), cada m³ de biogás producido evita aproximadamente 1,5 kg de CO₂ equivalente.
- Uso del digestato como fertilizante orgánico, rico en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, como alternativa a fertilizantes químicos.

Este análisis permite proyectar impactos ambientales positivos en caso de implementación del sistema en la comunidad.

6- RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos durante la recolección de residuos orgánicos domiciliarios en las 10 viviendas seleccionadas. La medición se realizó durante 8 días consecutivos, con registro diario por las familias participantes.

Tabla 2 - Residuos domiciliarios biodegradables (kg/día)

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8
1	0,845	0,903	0,79	0,754	0,82	0,891	0,698	0,85
2	0,654	0,597	0,52	0,607	0,599	0,756	0,567	0,62
3	0,685	0,614	0,455	0,528	0,5	0,579	0,68	0,597
4	0,82	0,659	0,75	0,6	0,63	0,675	0,701	0,684
5	0,592	0,504	0,63	0,79	0,532	0,596	0,612	0,45
6	0,563	0,498	0,593	0,505	0,607	0	0	0,597
7	0,66	0	0,456	0,59	0,605	0,596	0,544	0,467
8	0,624	0,492	0,472	0,615	0,66	0,583	0,715	0,62
9	0,541	0,502	0,477	0,436	0,487	0,512	0,632	0,55
10	0,674	0,635	0,788	0,712	0,78	0,698	0,763	0,73
Total	6,658	5,404	5,931	6,137	6,22	5,886	5,912	6,165
	48,313 kg							
Media	6,039 kg/día							

Fuente: El autor, 2025

A partir de los datos de recolección de residuos orgánicos realizados en 10 familias durante 8 días, se estimó un promedio de generación diaria de 0,60 kg por hogar. Con el objetivo de conocer la calidad de los residuos orgánicos recolectados como sustrato para digestión anaeróbica, se realizó la caracterización basada en el método de secado a 105 °C y calcinación a 550 °C, conforme a protocolos recomendados por la FAO (2011) y adaptados en estudios como Dos Santos Miranda *et al.* (2020) y Coello *et al.* (2021). El análisis permitió determinar el contenido de sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV) y cenizas. La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 3 - Resultados de la caracterización de los residuos.

Parámetros	Valores	Desvío Estandar
%ST	10,32	2,06
%Humedad	89,67	2,07
%STV	75,00	18,27
%Ceniza	25,00	18,27

Fuente: El autor, 2025

El porcentaje promedio de sólidos totales (ST) fue de 10,32% \pm 2,06, lo cual se encuentra dentro del rango esperado para residuos orgánicos frescos como frutas, verduras, cáscaras y restos cocidos, que suelen presentar entre 10% y 25% de materia seca sobre el peso húmedo (FAO, 2011; Alves, 2010).

Del total de sólidos, se determinó que en promedio el 75,00% \pm 18,27 corresponde a sólidos volátiles (STV), es decir, materia orgánica biodegradable que puede ser transformada en biogás mediante digestión anaeróbica. El 25,00% \pm 18,27 restante corresponde a cenizas, es decir, la fracción mineral no biodegradable, compuesta por fibras, minerales o pequeñas impurezas.

Estos valores son consistentes con los reportados por Coello *et al.* (2021), quienes caracterizaron residuos orgánicos domiciliarios en zonas urbanas y rurales, encontrando entre 70% y 85% de STV sobre ST. Según la FAO (2011), un contenido de sólidos volátiles superior al 65% se considera adecuado para la producción de metano.

Con relación a la humedad, se obtuvo un valor medio de 89,67% \pm 2,07, lo cual refleja la elevada proporción de agua contenida en estos residuos, condición favorable para el proceso de digestión anaeróbica.

En función de estos resultados, se concluye que los residuos generados por las familias participantes son aptos como materia prima para biodigestión anaeróbica, y su uso en biodigestores del tipo artesanal o familiar es técnica y ambientalmente viable.

Aunque las tres muestras analizadas correspondían al mismo residuo, se observaron pequeñas variaciones entre los resultados, atribuibles a factores operacionales de laboratorio, como microheterogeneidad del material y variaciones mínimas durante el secado y calcinación.

6.2 DEFINICIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR

Con base en los resultados obtenidos durante la caracterización de residuos domiciliarios, se estimó que cada familia genera en promedio 0,60 kg/día de residuos biodegradables. Considerando una proporción 1:2 de dilución con agua (Hartmann, 2025), la carga diaria estimada es de aproximadamente 1,2 litros por día.

Aplicando un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 20 días, adecuado para zonas subtropicales como Torin, el volumen requerido de digestión por familia se estimó en 24 L, mediante la ecuación 3. Este valor representa apenas el 12% de la capacidad total del biodigestor artesanal de 200 L propuesto, lo que confirma la viabilidad técnica del diseño e incluso permite su uso compartido entre dos hogares, manteniendo condiciones de operación estables.

6.3 CONSTRUCCION DEL BIODIGESTOR

El prototipo del biodigestor, desarrollado según el diseño presentado en la metodología, fue construido satisfactoriamente utilizando herramientas básicas y materiales accesibles. Su montaje confirmó la viabilidad técnica y económica del modelo artesanal propuesto, que ya fue detallada en la sección de evaluación económica. En las Figuras 9 y 10 puede ser observado el biodigestor montado.

Figura 9 - Biodigestor montado



Fuente: El autor, 2025

Figura 10: Entrada de biomasa, salida de gas y salida de biofertilizante.



Fuente: El autor, 2025

El proceso práctico permitió comprobar que el sistema puede ser replicado por los propios habitantes de la comunidad sin necesidad de mano de obra especializada, y que su construcción es rápida, sencilla y adaptable. Además, representa una herramienta pedagógica efectiva para promover la adopción de tecnologías sostenibles en contextos rurales.

6.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para estimar la viabilidad económica del sistema propuesto, se realizó un relevamiento detallado de los materiales utilizados en la construcción del prototipo de biodigestor artesanal de 200 litros. Los costos considerados incluyen todos los componentes físicos, como tambor plástico, adaptadores, conexiones, válvulas, materiales de sellado, mangueras y accesorios adicionales. La siguiente Tabla 4 resume los costos unitarios y totales de cada componente.

Tabla 4 - Materiales para la construcción de Biodigestor

Material	Cantidad	P. Unitario	Costo (Gs)
Tambor Plástico de 200L	1	163.000	163.000
Curva Soldable 90 x 50	1	20.000	20.000
Adaptador Corto 50 x 1 ½	1	5.000	5.000
Adaptador PVC rosca 50x 1 ½	1	63.000	63.000
Adaptador PVC rosca 20x ½	1	63.000	39.000
CAP tapa PVC 50 mm	2	4.000	8.000
CAP tapa PVC 100 mm	2	14.000	28.000
Alma doble rosca ½	4	1.000	4.000
Retén Goma para PVC de 50 mm	2	4.000	8.000
Registro Corta Fuego	1	74.000	74.000
Unión Simple Soldable 20 mm	1	1.500	1.500
Unión Sencilla Roscable 1/2 "	1	2.000	2.000
Caño PVC Cloacal 50 mm	1 m	12.000	12.000
Caño PVC Cloacal 100 mm	1,5 m	55.000	15.000
Adhesivo Poliuretano Gris 380 gr	1	18.500	18.500
Manguera para Gas 1,2 m	3	17.000	51.000
Registro Esfera Soldable 50 mm	1	49.000	49.000
Abrazadera metálica	4	3.500	14.000
Pegamento PVC	1	8.000	8.000
Canilla para jardín	2	7.000	14.000
Cámara de Vehículo (Usado)	1	-	150.000
Cinta Teflón	1	7.000	7.000
Esponja de Acero	1	7.000	7.000
TOTAL			761.000

Fuente: El autor, 2025.

El costo total del prototipo fue de 103,53 USD (761.000 G), considerando todos los materiales utilizados. Este valor no incluye la mano de obra, ya que el sistema fue construido de forma experimental por la autora, con apoyo de materiales de referencia (Alves, 2010; FAO, 2011).

Comparado con sistemas comerciales de mayor capacidad, el modelo artesanal representa una alternativa económica y replicable, especialmente para comunidades rurales o de bajos recursos. Además, su diseño modular permite realizar adaptaciones según la cantidad de usuarios. Según Alves (2010) y la FAO (2011), los sistemas comerciales de biodigestores familiares prefabricados (por ejemplo, en polietileno o fibra de vidrio) pueden costar entre 500 a 1.500 USD, dependiendo del volumen (entre 1.000 y 5.000 litros), la tecnología empleada y los accesorios incluidos.

Para la proyección de ahorro energético y beneficios económicos derivados del uso del biogás, teniendo como base los resultados de recolección y caracterización de residuos domiciliarios, los resultados son presentados en la Tabla 5.

Tabla 5 - Estimación de producción de biogás y ahorro energético por familia y comunidad

Parámetro	Por familia (diario)	Por familia (mensual)	Comunidad (300 familias, mensual)
Residuos orgánicos generados (kg)	0,627 kg	18,81 kg	5.643 kg
Sólidos Totales Volátiles (STV) (kg)	0,0485 kg	1,455 kg	436,5 kg
Biogás producido (m ³)	0,0291 m ³	0,873 m ³	261,9 m ³
Energía útil (kWh)	0,1746 kWh	5,238 kWh	1.571,4 kWh
Equivalente en GLP (kg)	0,0134 kg	0,402 kg	120,6 kg
Ahorro económico estimado (Gs)	174 Gs	5.226 Gs	1.567.800 Gs

Fuente: Elaboración propia con base en FAO (2011) y Alves (2010).

Se observa que cada familia podría generar aproximadamente 0,0291 m³ de biogás por día, lo que representa una energía útil de 0,1746 kWh diarios. Esta cantidad equivale a 0,0134 kg de GLP, y supondría un ahorro económico mensual de aproximadamente 0,711 USD (5.226 Gs) por familia. Considerando un rendimiento de 0,6 m³ de biogás por kg de STV (Alves, 2010) y asumiendo un precio medio de 13.000 Gs/kg de GLP, según cotización realizada el día 18 de julio de 2025 en la ciudad de Caaguazú, se estimó el ahorro

económico potencial derivado del uso del biogás.

Al proyectar estos resultados para toda la comunidad (300 familias), se estima una producción mensual total de 261,9 m³ de biogás, equivalente a 1.571 kWh de energía útil, o 120,6 kg de GLP, con un ahorro económico de 213,30 USD (1.567.800 Gs) por mes.

Estos resultados permiten concluir que, aunque el ahorro individual puede parecer modesto, el impacto comunitario es significativo. Además, el uso del biogás como fuente alternativa de energía contribuye a la valorización de residuos orgánicos y a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles.

Además del análisis de costos directos, se realizó una evaluación de viabilidad económica con el fin de identificar a partir de qué valor del GLP el uso de biogás se vuelve económicamente competitivo. Para ello, se consideró el volumen mensual de biogás producido, su contenido energético y la fracción efectiva de sustitución del GLP. El costo total del biodigestor se distribuyó a lo largo de distintas vidas útiles teóricas (1, 2, 5 y 10 años), incorporando también un costo de mantenimiento equivalente al 5 % anual del valor del equipo. Con estos datos fue posible estimar el costo nivelado del biogás por metro cúbico y, posteriormente, determinar el precio mínimo del GLP a partir del cual el sistema comenzaría a generar un ahorro real para el usuario.

El poder calorífico inferior del metano (9,97 kWh/m³), ampliamente referenciado en literatura termoquímica (PERRY; GREEN; MALONEY, 2008), permitió obtener una base energética precisa para la estimación. Este valor se relacionó con el PCI promedio del biogás utilizado en los cálculos del sistema (6 kWh/m³), típico de mezclas con 55–60 % de metano (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2011). Con estas equivalencias se determinó el reemplazo energético en términos de GLP, considerando la eficiencia calórica relativa de ambos combustibles.

Los resultados muestran que, con la producción actual estimada para el biodigestor (0,0291 m³/día), el costo del biogás generado continúa por encima del precio comercial vigente del GLP en Paraguay, lo que implica que el sistema no alcanza la viabilidad económica inmediata bajo condiciones domésticas individuales. Para que el biogás resulte competitivo, el precio del GLP debería situarse por encima del valor límite calculado para cada escenario de vida útil.

Tabla 6: Precio Limite del GLP

Producción (m³/día)	Fracción sustituida	1 año	2 años	5 años	10 años
0,0291 (caso actual)	30%	74,94	39,26	17,84	10,71
0,0291	50%	44,97	23,55	10,71	6,42
0,0291	100%	22,48	11,78	5,35	3,21
0,080	100%	8,18	4,28	1,95	1,17
0,100	100%	6,54	3,43	1,56	0,93

Fuente: El autor, 2025

Por ejemplo, considerando una vida útil de 5 años, el sistema se torna viable únicamente si el precio del GLP supera aproximadamente 5,35 USD/kg en caso de sustitución total del consumo; si la sustitución fuera parcial (50 % o 30 %), el precio límite requerido es aún mayor.

También se evaluaron escenarios con mayores volúmenes de producción de biogás, ya que el rendimiento del biodigestor depende directamente de la cantidad y calidad de los residuos orgánicos disponibles. Cuando se modelan producciones hipotéticas de 0,08–0,10 m³/día, valores posibles en sistemas comunitarios o institucionales, el costo del biogás disminuye significativamente, reduciendo el precio límite del GLP a rangos de 1,5–1,9 USD/kg.

Tabla 7: Costo del biogás por m³

Vida útil (años)	Costo estimado (USD/m³)
1	10,38
2	5,44
5	2,47
10	1,48

Fuente: El autor, 2025

En estas condiciones, la viabilidad económica puede alcanzarse en contextos reales, especialmente cuando el biodigestor se utiliza de manera colectiva o cuando el ahorro por sustitución de leña o GLP es mayor. Si bien el sistema evaluado a escala domiciliaria no

logra cubrir su costo total en un período corto, el análisis evidencia que la viabilidad aumenta cuando la producción de biogás es mayor y cuando el equipo se utiliza en entornos donde la demanda energética es elevada y constante, como comedores escolares o comunitarios. Esto refuerza que la implementación del biodigestor puede ser más eficiente económicamente cuando se articula a nivel institucional.

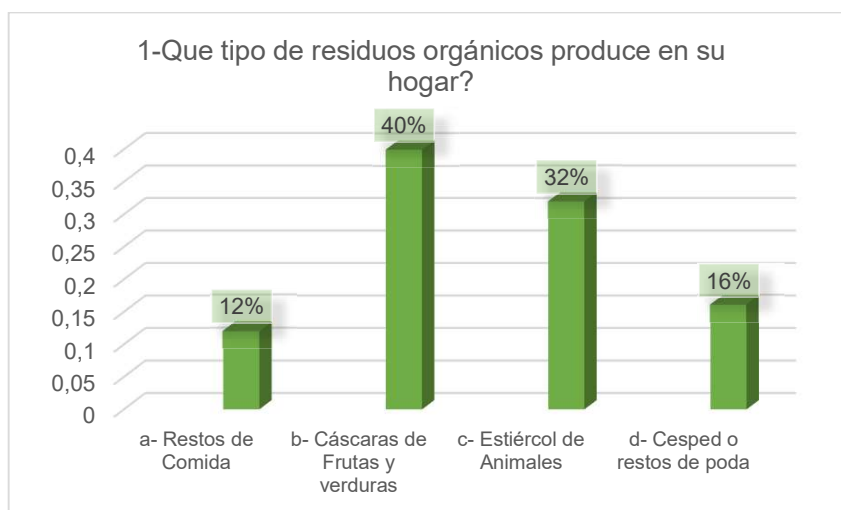
6.5 EVALUACIÓN SOCIOAMBIENTAL

Como parte del diagnóstico comunitario, se aplicó una encuesta a los pobladores de la comunidad de Torin con el objetivo de conocer el manejo actual de los residuos orgánicos y la percepción sobre el uso de biodigestores como tecnología apropiada. El cuestionario se encuentra en el anexo.

Para comprender la disponibilidad de residuos orgánicos en la comunidad, se preguntó a los encuestados sobre los tipos que generan habitualmente en sus hogares.

En la Figura 11 se observa que el 40% de los hogares encuestados declaró generar principalmente cáscaras de frutas y verduras, seguido por el estiércol de animales (32%) y césped o restos de poda (16%). Solo el 12% indicó que produce principalmente restos de comida.

Figura 11 - Tipos de residuos orgánicos generados en los hogares encuestados.



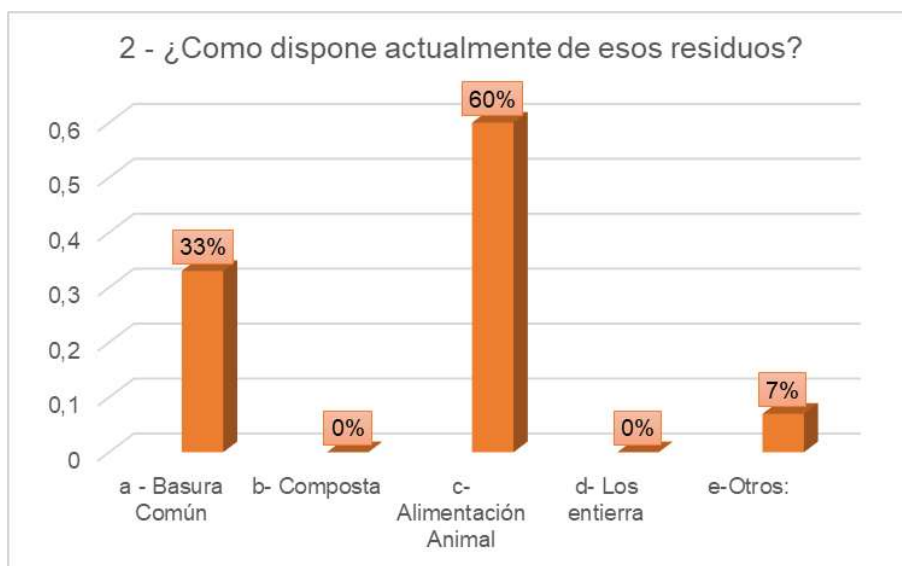
Fuente: El autor, 2025

Este resultado refleja un patrón típico de comunidades rurales o semirurales con producción agrícola y cría de animales, lo cual es favorable para sistemas de biodigestión,

ya que los residuos vegetales y estiércoles son materias primas comúnmente utilizadas para la generación de biogás (FAO, 2011).

A continuación, se indagó sobre las prácticas actuales de disposición de estos residuos. El 60% de los participantes indicó que utiliza sus residuos para alimentación animal, mientras que un 33% los desecha con la basura común, como muestra la Figura 12. Un 17% mencionó que los usa como abono en la huerta. No se registraron respuestas para las opciones de compostaje ni entierro. Esto muestra una práctica mayoritariamente funcional, aunque aún hay potencial para incorporar métodos más sostenibles como el compostaje o biodigestores.

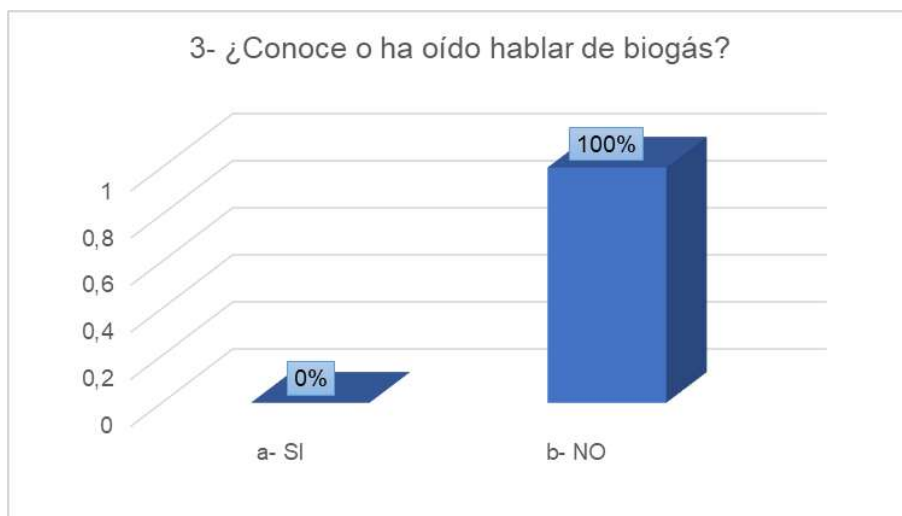
Figura 12 - Formas actuales de disposición de residuos en la comunidad



Fuente: El autor, 2025

En cuanto al conocimiento previo sobre el tema, se consultó si los encuestados habían oído hablar del biogás. El 100% de los encuestados indicó que no conoce o nunca ha oído hablar del biogás (Figura 13). Este resultado destaca la necesidad de campañas educativas y de difusión sobre el tema, especialmente si se desea implementar un sistema de biodigestores en la comunidad.

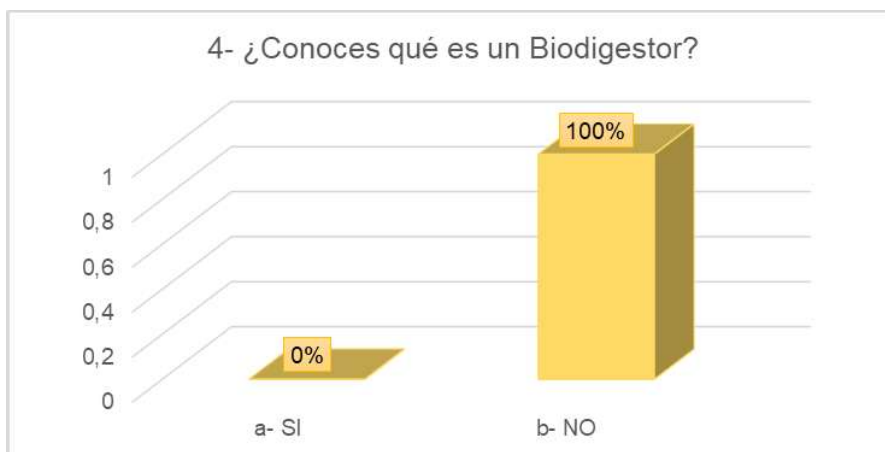
Figura 13 - Conocimiento sobre el biogás entre los encuestados



Fuente: El autor, 2025.

Del mismo modo, se exploró el conocimiento sobre qué es un biodigestor. Al igual que en la pregunta anterior, ningún encuestado manifestó conocer lo que es un biodigestor (Figura 14). Esta falta de conocimiento constituye una barrera inicial, pero también una oportunidad para introducir capacitaciones específicas y contextualizadas.

Figura 14: Conocimiento sobre el uso de biodigestores

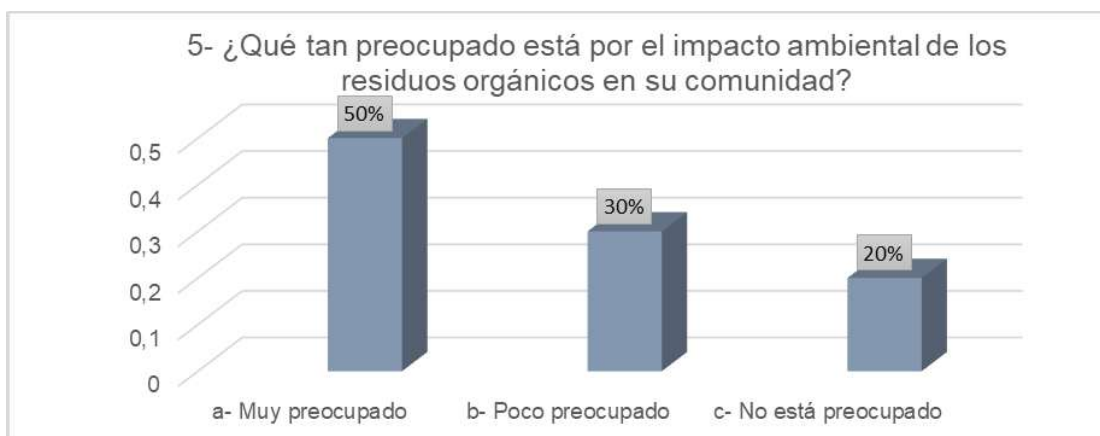


Fuente: El autor, 2025

Para conocer el grado de conciencia ambiental, se consultó sobre el nivel de preocupación frente al impacto de los residuos orgánicos. Un 50% de los encuestados se manifestó muy preocupado por el impacto ambiental de los residuos, mientras que un 30%

expresó estar poco preocupado y un 20% dijo no estar preocupado, como muestra la Figura 15. Esto refleja que la mitad de la población tiene un nivel de conciencia ambiental elevado, lo cual puede facilitar la adopción de prácticas más sostenibles.

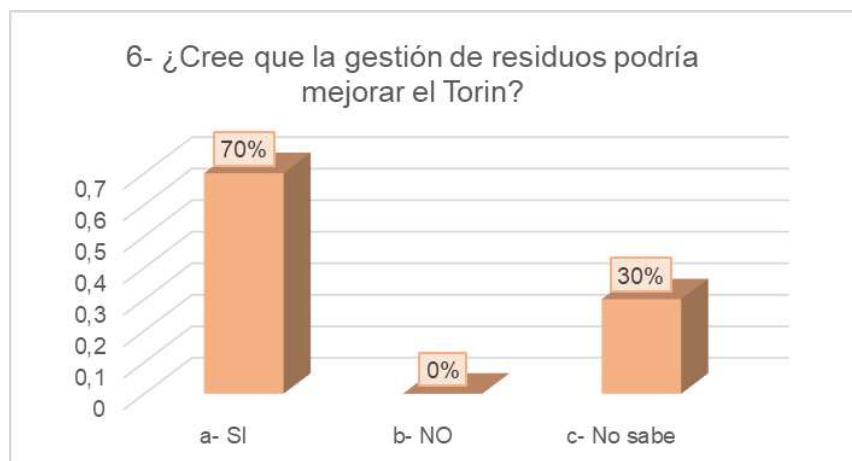
Figura 15 - Nivel de preocupación por el impacto ambiental de los residuos



Fuente: El autor, 2025

También se evaluó la percepción de los encuestados respecto a la gestión de residuos en la comunidad. El 70% considera que la gestión de residuos puede mejorar en su comunidad, mientras que el 30% indicó no saber (Figura 16). Ninguna persona respondió que no podría mejorar, lo cual sugiere una percepción generalizada de que existen oportunidades de mejora en este ámbito.

Figura 16 - Percepción sobre la gestión de residuos en Torin



Fuente: El autor, 2025

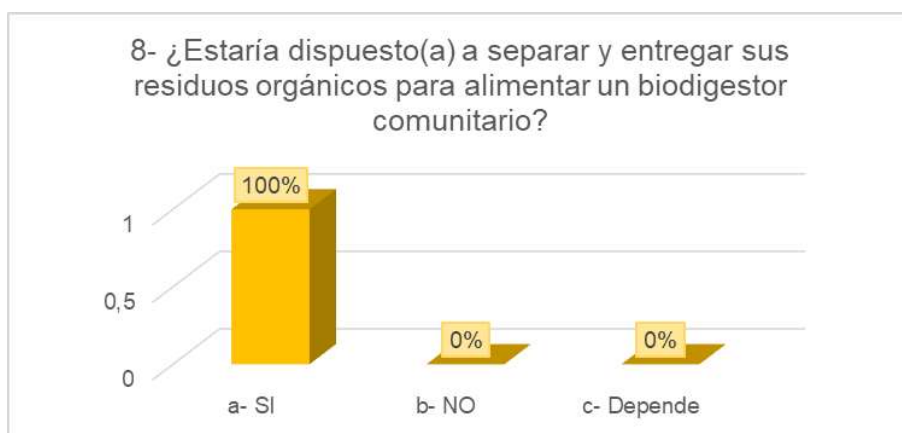
Posteriormente, se presentó una posible solución y se consultó si consideraban útil un sistema de producción de biogás. El 100% de los encuestados respondió afirmativamente, lo que indica una actitud altamente positiva hacia la implementación de tecnologías como los biodigestores, a pesar del desconocimiento inicial sobre el tema, conforme resultado presentado en la Figura 17.

Figura 17 - Aceptación del uso de biogás como solución comunitaria

Fuente: El autor, 2025

Se preguntó si estarían dispuestos a colaborar en la separación y entrega de residuos para un sistema comunitario. Nuevamente, todas las personas encuestadas respondieron que sí (Figura 18), lo que demuestra una disposición total a colaborar con la recolección diferenciada de residuos orgánicos para su aprovechamiento energético.

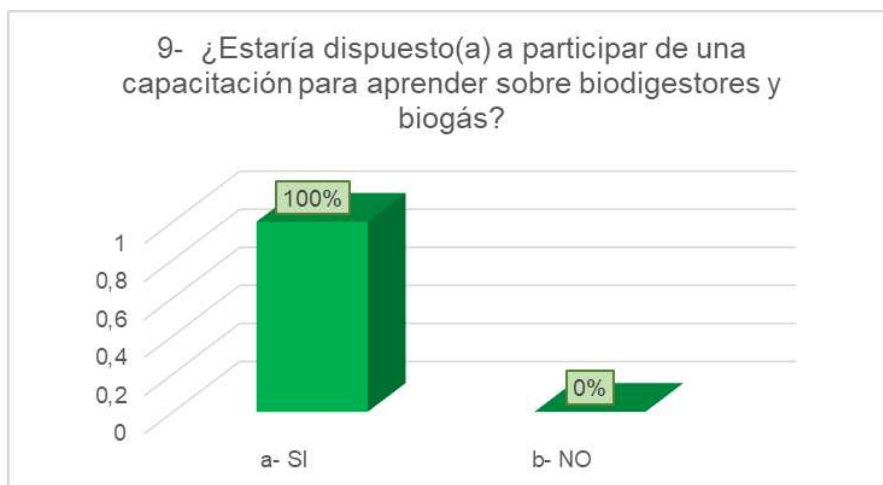
Figura 18 - Disposición a separar residuos para un biodigestor comunitario.



Fuente: El autor, 2025.

Asimismo, se evaluó el interés por recibir capacitación en el uso de biodigestores. El 100% manifestó estar dispuesto a participar en capacitaciones (Figura 19), lo que refuerza la posibilidad de iniciar procesos de formación comunitaria para asegurar una implementación exitosa del sistema.

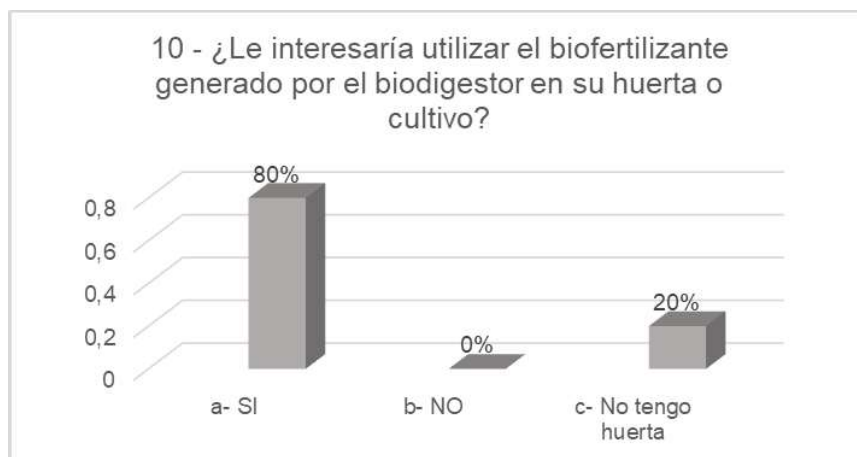
Figura 19 - Interés en capacitarse sobre biogás y biodigestores



Fuente: El autor, 2025

Finalmente, se consultó sobre el interés en utilizar el biofertilizante resultante del proceso. El 80% respondió que sí, mientras que el 20% indicó no tener huerta. Ningún encuestado expresó desinterés, lo que señala una alta aceptación del subproducto del proceso de biodigestión, especialmente en contextos agrícolas o hortícolas, como puede ser visto en la Figura 20.

Figura 20 - Interés en utilizar el biofertilizante generado en la huerta



Fuente: El autor, 2025.

Los resultados de la encuesta permiten afirmar que, si bien existe un conocimiento muy limitado sobre el biogás y los biodigestores, la disposición y el interés de la comunidad por participar activamente en proyectos sostenibles es notable. La totalidad de los

encuestados manifestó apertura hacia la separación de residuos, el uso de biodigestores y la participación en capacitaciones, lo que demuestra un alto potencial para la implementación de soluciones tecnológicas apropiadas. Además, el interés en utilizar el biofertilizante en actividades agrícolas refuerza el vínculo entre el sistema propuesto y la realidad productiva local.

Desde el punto de vista ambiental, la implementación del biodigestor también representaría una contribución significativa a la reducción de emisiones. Considerando una producción diaria de 0,028 m³ de biogás por familia, se estima que podrían evitarse aproximadamente 1,5 kg de CO₂ equivalente por cada metro cúbico de biogás generado (FAO, 2011). Esto equivale a 0,042 kg de CO₂ evitado por hogar al día, y a un total de 12,6 kg mensuales para un conjunto de 300 familias, lo cual refuerza el potencial de mitigación climática del sistema.

Asimismo, el uso del digestato como fertilizante permitiría reducir la dependencia de insumos químicos, mejorar la fertilidad del suelo y cerrar un ciclo virtuoso de aprovechamiento de residuos dentro de la comunidad. Por tanto, tanto los impactos sociales como los ambientales evidencian que la tecnología propuesta no solo es factible, sino también deseable desde una perspectiva integral de sostenibilidad.

7- CONSIDERACIONES FINALES

Este trabajo de investigación permitió evaluar la viabilidad técnica, económica y social de implementar un sistema de producción de biogás mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos domiciliarios en la comunidad de Torin, Caaguazú. La caracterización de residuos realizada en una muestra representativa de 10 familias demostró que existe una cantidad significativa de materia orgánica biodegradable disponible diariamente, lo que confirma el potencial del biogás como fuente alternativa de energía local.

La construcción del prototipo de biodigestor artesanal de 200 litros permitió estimar los costos de implementación y demostrar la posibilidad de replicación con materiales accesibles. Aunque el sistema no fue operado debido a condiciones climáticas desfavorables durante el período de invierno y limitaciones de tiempo, se pudo establecer su factibilidad a nivel técnico y económico, y se sentaron las bases para su puesta en marcha futura.

Asimismo, la estimación de producción energética y ahorro económico a nivel individual y comunitario evidenció que el biogás puede cubrir parte de las necesidades energéticas familiares, generando beneficios adicionales como la reducción de residuos, el uso de fertilizante natural (digestato) y la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero. La alta aceptación comunitaria registrada a través de las encuestas refuerza la importancia de promover tecnologías apropiadas que integren criterios sociales y ambientales en su implementación.

En relación con la caracterización de los residuos, se determinó un contenido promedio de sólidos totales de $10,32\% \pm 2,07$, con un $75\% \pm 18,27$ de sólidos volátiles y $25\% \pm 18,27$ de cenizas. Estos valores confirman que la fracción biodegradable es predominante, garantizando un buen rendimiento en la producción de biogás. Además, el potencial bioquímico de metano estimado respalda la idoneidad de los residuos como sustrato. Estos resultados técnicos validan que los desechos orgánicos de la comunidad no solo son abundantes, sino también adecuados en calidad para la generación de energía renovable.

En términos cuantitativos, los resultados mostraron que cada familia puede generar en promedio $0,0291 \text{ m}^3$ de biogás por día, equivalente a $0,1746 \text{ kWh}$ de energía útil. Este valor representa un ahorro mensual aproximado de $0,711 \text{ USD}$ por familia (5.226 Gs), que proyectado a las 300 familias de la comunidad asciende a más de 213 USD mensuales ($\approx 1.567.800 \text{ Gs}$). A nivel técnico, se determinó un tiempo de retención hidráulica de 20 días

y un volumen útil de 24 L por familia, utilizando solo el 12% de la capacidad del prototipo, lo que confirma la posibilidad de escalar la tecnología a mayor producción sin comprometer su eficiencia. Estos valores fortalecen la conclusión de que el sistema es técnica y económicamente viable, y que su implementación tendría un impacto significativo en la comunidad de Torin.

8- RECOMENDACIONES

- **Para puesta en operación del prototipo:** Se recomienda realizar una fase piloto en condiciones climáticas adecuadas, para validar el rendimiento real del biodigestor y monitorear parámetros como presión de gas, pH, temperatura y volumen de metano producido.
- **Ampliación del muestreo:** Para futuras investigaciones, se sugiere ampliar el número de familias evaluadas y considerar otros residuos potenciales como estiércol, restos de ferias o residuos agroindustriales locales.
- **Capacitación comunitaria:** Es fundamental capacitar a los beneficiarios en el manejo y mantenimiento de biodigestores, fomentando el sentido de pertenencia y sostenibilidad del sistema.
- **Alianzas con instituciones locales:** Se recomienda buscar alianzas con gobiernos municipales, ONG o centros educativos que puedan apoyar en la financiación, instalación y seguimiento de sistemas a mayor escala.
- **Evaluación ambiental y sanitaria:** Se sugiere incluir en futuras etapas un monitoreo del uso del digestato como fertilizante y una evaluación de sus impactos en el suelo y en la salud comunitaria.

9- BIBLIOGRAFÍA

ARAÚJO, L. et al. Manual de diseño y operación de biodigestores. Universidad Federal de Pernambuco, 2015.

ALVES, E. E. N. *Curso Biodigestores: construção, operação e usos do biogás*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. 84 p.

BARRERA-CARDOSO, E. L.; ODALES-BERNAL, L.; CARABEO-PÉREZ, A.; ALBA-REYES, Y.; HERMIDA-GARCÍA, F. O. Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural. *Tecnología Química*, Sancti Spíritus, v. 40, n. 2, p. 303-318, 2020. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v40n2/2224-6185-rtq-40-02-303.pdf>. Acceso en: 11 de noviembre de 2024.

BOND, T.; TEMPLETON, M.R.; et al. History and future of domestic biogas plants in the developing world. 2011. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/257434420_History_and_future_of_domestic_biogas_plants_in_the_developing_world?utm_source=chatgpt.com. Acceso en: 11 de noviembre de 2024.

BLANCO, D.; CEPERO, L.; SAVRAN, V.; DÍAZ PIÑÓN, M. R.; SUÁREZ, J.; PALACIOS, A. Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y Forrajes*, Matanzas, v. 35, n. 2, p. 219-226, 2012. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2691/269125071009.pdf> . Acceso en: 17 ene. 2025.

Chen, Y., Cheng, J., y Creamer, K. (2008). "Inhibition of Anaerobic Digestion Process: A review." *Bioresource Technology*, 99(10), 4044-4064. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852407001563>. Acceso en: 19 de octubre de 2024

COELLO, J.; GONZÁLEZ, R.; MARTÍNEZ, C. *Aprovechamiento energético de la biomasa residual*. Quito: Instituto de Energías Renovables, 2021. 120 p.

CIAP. Centro de Información Agropecuaria del Paraguay. (2015). Digestión anaerobia de purines de cerdo y codigestión con residuos de la industria alimentaria. Disponible en: <https://www.ciap.org.ar>. Acceso en: 20 de enero de 2025.

DA CUNHA, C. A.; REIN, O.; Biodigestor Rural. 2008. Disponible en: <https://www.unaerp.br/documentos/778-biogestor-rural>. Acceso en: 05 de marzo de 2025.

DOS SANTOS MIRANDA, J. P.; VAN DER KROGT, S.; PORTILLO, A. *Biodigestores como complemento de la cadena productiva de la soja, maíz y trigo en Paraguay: estudio de pre-factibilidad técnica y económica*. 2020. Disponible en: <https://repositorio.conacyt.gov.py/xmlui/handle/20.500.14066/3806>. Acceso en: 15 nov. 2024.

FAO. 2011. MANUAL DE BIOGÁS Disponible en: <https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>. Acceso en: 19 de septiembre de 2024

FAO. GUÍA TEÓRICO-PRÁCTICA SOBRE EL BIOGÁS Y LOS BIODIGESTORES N° 12, 2019. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b317eeae-270f-48f4-92d7-3e0ff8a7873/content> . Acceso en: 20 ene. 2025.

GOBIERNO DE PARAGUAY. Informe de Energías Renovables. 2020. Disponible en: <https://informacionpublica.paraguay.gov.py/public/407784-InformeEnergiasRenovablespdf-InformeEnergiasRenovables.pdf> . Acceso en: 14 de diciembre de 2024.

GONÇALVES, A. D.; SANTOS, D. M.; PEREIRA, G. S.; CARVALHO, J. I.; DE CAMPOS, L.; et al. Dimensionamento e análise da viabilidade técnica e econômica de um biodigestor tubular. ., 2018. Disponible en: https://www.ifmg.edu.br/arcos/ensino-1/tai/20181_TAI3_Biodigestortubular.pdf/view . Acceso en: 02 de diciembre de 2024

HARTMANN, R. M. (Coord.). *Pequenos Biodigestores: manual de montagem, manual de operação, manual pedagógico*. Foz do Iguaçu: UNILA, 2025.

IRENA. Rutas de la Bioenergía Sostenible en América Latina. Agencia Internacional de Energías Renovables, 2024. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jan/IRENA_Sustainable_bioenergy_Latin_America_2024_ES.pdf . Acceso en: 15 de diciembre de 2024.

LAMO ANUARBE, P. Aprovechamiento Energético de Biogás. Estrategias para el Uso Eficiente de Residuos Orgánicos. Universidad de Cantabria, 2011. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/9615> . Acceso en: 11 de noviembre de 2024.

LOVERA, L. Estado del arte y novedades de la bioenergía en el Paraguay. 2011. Disponible en: <https://www.fao.org/4/as414s/as414s.pdf> . Acceso en: 10 de noviembre de 2024.

Mata-Alvarez. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. 2014. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114002664> . Acceso en: 18 de noviembre de 2024.

PARAGUAY. Viceministerio de Minas y Energía. Matriz energética en Paraguay. 2024. Disponible en: https://minasyenergija.mopc.gov.py/index.php?Itemid=765&id=1628&option=com_content&view=article . Acceso en: 18 ene. 2025.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

RAMOS, J. et al. Guía para el dimensionamiento de biodigestores en contextos rurales. Asociación de Energías Renovables de América Latina, 2021.

SLIDESERVE. *Taller – Biodigestores y Biogas*. 19 set. 2014. Disponible en: <https://www.slideserve.com/orea/taller-biodigestores-y-biogas> . Acceso en: 15 nov. 2024.

UNA, FCA. Construcción e instalación de un biodigestor tubular. PPTX. Disponible en: <https://es.slideshare.net/slideshow/construccion-e-instalacion-de-un-biodigestor-tubular/39042786>. Acceso en: 18 de enero de 2025

VARGAS, C. N. Aprovechamiento Sostenible de Residuos Sólidos Orgánicos para la Generación de Biogás en una Finca Ganadera de Economía Familiar en Timaná (Huila), 2020. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/items/6a0b3a3d-3a15-47c3-a9b8-1510ab90f349>. Acceso en: 30 de octubre de 2024

VARGAS, H. Estudio del potencial de desarrollo de iniciativas de biogás a nivel productivo en Paraguay. 2017. Disponible en: <https://repositorio.conacyt.gov.py/> . Acceso en: 20 sept. 2024.

VAPSBDDGIRÁS; AGENCIA DE RESIDUOS DE CATALUÑA. *Guía para el Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos: Compostaje y Lombricultura*. 1. ed. La Paz: VAPSBDDGIRÁS; ARC, 2013. Disponible en: <https://redcompostaje.mmaya.gob.bo/files/biblioteca/04%20GUIAS%20MANUALES/201%20Gu%C3%ADa%20para%20el%20Aprovechamiento%20de%20Residuos%20S%C3%B3lidos%20Org%C3%A1nicos.pdf>. Acceso en: 12 de noviembre de 2024.

ANEXOS

ANEXO I - ENCUESTA A POBLADORES

1. Qué tipo de residuos orgánicos produce en su hogar? (puede marcar más de uno)
 - Restos de comida
 - Cáscaras de frutas y verduras
 - Estiércol de animales
 - Césped o restos de poda
 - Otro: _____

2. ¿Cómo dispone actualmente estos residuos?
 - Basura común
 - Composta
 - Alimentación animal
 - Los entierra
 - Otro: utiliza como abono en la huerta

3. ¿Conoce o ha oído hablar del biogás?
 - Sí
 - No

4. ¿Conoce qué es un biodigestor?
 - Sí
 - No

5. ¿Qué tan preocupado está por el impacto ambiental de los residuos orgánicos en su comunidad?
 - Muy preocupado

- Poco preocupado
- No está preocupado

6. ¿Cree que la gestión de residuos podría mejorar en Torín?

- Sí
- No
- No sabe

7. ¿Cree que un sistema que transforme residuos en energía (biogás) puede ser útil para su comunidad?

- Sí
- No
- No sabe

8. ¿Estaría dispuesto(a) a separar y entregar sus residuos orgánicos para alimentar un biodigestor comunitario?

- Sí
- No
- Depende (¿de qué?): _____

9. ¿Estaría dispuesto(a) a participar de una capacitación para aprender sobre biodigestores y biogás?

- Sí
- No

10. ¿Le interesaría utilizar el biofertilizante generado por el biodigestor en su huerta o cultivo?

- Sí
- No
- No tengo huerta

ANEXO II – MANUAL PARA CONSTRUCCIÓN DE BIODIGESTORES

Procedimiento de construcción

Paso 1 – Preparación del tanque

- Lavar y secar completamente el tanque.
- Para la entrada del sustrato:

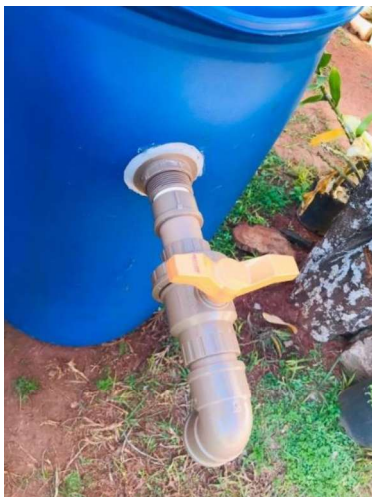


Marcar el punto donde irá la entrada del sustrato (parte superior) y realizar un agujero de 100 mm.



Dentro del agujero, colocar un caño de PVC de 100 mm, de aproximadamente 90 cm de largo, realizándole cortes en V en la parte inferior, esto evitará acúmulo de sustrato en el local y facilitará su dispersión; en la parte superior se le debe poner una tapa CAP con goma, que es para mejorar el cierre.

- Para la salida del biofertilizante:

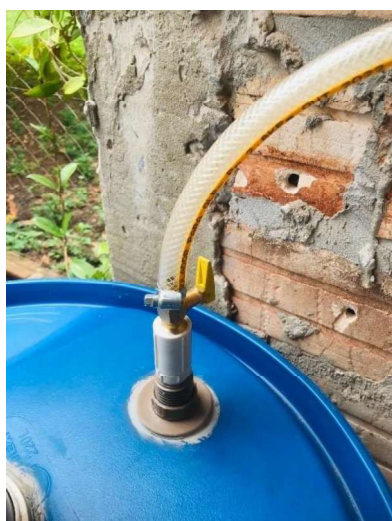


Marcar el punto para la salida del biofertilizante (parte inferior lateral), y realizar la perforación, aproximadamente a 70 cm de la base, aquí irá una llave esfera de 50 mm, con adaptador y un codo de 90°, todos de 50 mm.



En la parte interna para la salida de biofertilizante, debe ser colocado un codo de 90° con una extensión del caño de PVC de unos 35 cm.

- Para salida de biogás



Marcar el punto de salida del biogás (tapa o parte superior del tanque) y hacer la perforación con 20 cm de diámetro. Colocar un adaptador rosca soldable de 20 cm, conectada una llave corta fuego para paso del gas y manguera.

- Para el filtro de H₂S:



Utilizar caño de PVC de 50 mm, con 35 cm de largo, con 2 tapas CAP a los extremos, realizándoles perforaciones de 20 mm, en donde serán colocados adaptadores PVC rosca de ½, también se utiliza abrazaderas metálicas para asegurar la fijación. En la parte interna del PVC se coloca esponja de acero y en ambos lados de las tapas ponemos mangueras, una será el de la salida del biodigestor y la otra que irá a la cámara de almacenamiento de biogás.

- Para almacenamiento de biogás:

Se utiliza una cámara de vehículo, conectándola a una manguera de encaje rápido, con válvula especial para soportar presión.



Observaciones: Para la Perforación del tanque

1. Usar broca de corona del tamaño adecuado al adaptador PVC.
2. Perforar cuidadosamente para evitar grietas.
3. Limpiar los bordes y retirar rebabas.
4. Utilizar pegamento PVC para adherencia y adhesivo poliuretano en donde se realizaron perforaciones para evitar fugas.

¡SISTEMA COMPLETO!