

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/minerva.v6i18.219>

Aprovechamiento energético sostenible evaluado mediante un enfoque multicriterio a partir de biogás producido con tierra filtrante

Luz Elena Maldonado Alvarez*
<https://orcid.org/0009-0009-0246-9957>
maldonadoluzelena20@gmail.com
Universidad Simón Bolívar
Caracas, Venezuela

José Luciano Maldonado
<https://orcid.org/0009-0004-9001-2917>
jlmaldonaj@gmail.com
Universidad de Los Andes
Merida, Venezuela

*Autor de correspondencia: maldonadoluzelena20@gmail.com

Recibido (02/06/2025), Aceptado (03/07/2025)

Resumen. En el presente trabajo se analiza la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de generar energía eléctrica a partir de biogás producido con tierra filtrante; un subproducto orgánico de procesos industriales. A partir de una disponibilidad diaria de 20.000 kg de sustrato, se estimó una producción de 187 m³/h de biogás y una potencia eléctrica de 874 kWe. Se aplicaron metodologías de evaluación multicriterio (*AHP*, *TOPSIS* y *ELECTRE*), cuyos resultados evidencian fortalezas en las dimensiones ambiental, social y técnica, sin embargo, una limitación importante se encontró en el aspecto económico. El estudio, contextualizado en Bolivia, resalta el potencial de valorización energética de residuos orgánicos en economías emergentes, y plantea la necesidad de incentivos y escalamiento para garantizar la rentabilidad del proyecto.

Palabras clave: biogás, tierra filtrante, análisis multicriterio, generación eléctrica, sostenibilidad.

Sustainable Energy Utilization Assessed Through a Multi-criteria Approach from Biogas Produced with Filter Cake

Abstract. This study examines the technical, economic, social, and environmental feasibility of generating electricity from biogas derived from filter cake, an organic byproduct of industrial processes. Assuming a daily substrate availability of 20,000 kg, the estimated biogas production was 187 m³/h, yielding an electrical output of 874 kWe. Multicriteria decision analysis methods, including *AHP*, *TOPSIS*, and *ELECTRE*, were applied to evaluate the project. The results demonstrate strong performance in the environmental, social, and technical dimensions but reveal significant economic constraints. Situated in the Bolivian context, this research highlights the potential for energy recovery from organic waste in emerging economies while underscoring the need for policy incentives and operational scaling to ensure financial viability.

Keywords: biogas, filter cake, multicriteria analysis, electricity generation, sustainability.

I. INTRODUCCIÓN

En muchos procesos industriales y agrícolas se genera una considerable cantidad de tierra filtrante, la cual suele descartarse como residuo sin ningún tipo de aprovechamiento. Sin embargo, este subproducto que presenta un alto contenido de materia orgánica ofrece un potencial energético que ha comenzado a ser explorado en diversos países. Experiencias internacionales en lugares como Alemania, India, Brasil y China han demostrado que este tipo de material puede ser transformado en biogás mediante digestión anaeróbica, dando paso a una alternativa limpia para la generación de electricidad y calor [1].

El biogás es una mezcla compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono. Su uso como combustible en la generación de energía eléctrica representa una doble oportunidad: por un lado, permite reducir las emisiones contaminantes que se producirían si este material se descompusiera de forma descontrolada en el ambiente; por otro lado, transforma un residuo sin valor en un recurso energético útil, alineado con los principios de la economía circular [2].

Actualmente, la valorización de residuos para la producción de energía renovable es un tema de creciente interés, tanto en el ámbito académico como en el sector productivo. A pesar de ello, el aprovechamiento específico de la tierra filtrante como sustrato principal no está suficientemente documentado, especialmente en países de Latinoamérica. Esta situación plantea una oportunidad clara para desarrollar alternativas energéticas que puedan ser implementadas a nivel local, contribuyendo, además, a la gestión integral de residuos [3].

Para abordar esta problemática, desde una perspectiva más completa, es fundamental no limitarse únicamente a los aspectos técnicos o económicos del proceso. Por ello, esta investigación incorpora un enfoque de análisis multicriterio, que permite considerar simultáneamente diferentes variables relevantes, como la viabilidad técnica, el impacto ambiental, la inversión necesaria y el impacto social. Herramientas como *AHP*, *TOPSIS* y *ELECTRE* han sido ampliamente utilizadas en estudios similares para apoyar la toma de decisiones en investigaciones sobre generación energética.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de generación eléctrica utilizando biogás producido a partir de 20.000 kg diarios de tierra filtrante, lo que, bajo condiciones controladas, puede traducirse en una producción cercana a los 187 m³/h de biogás y una capacidad de generación de 874 kWe. Con este estudio se busca demostrar la viabilidad del sistema, al mismo tiempo que se sientan las bases para su posible aplicación en contextos similares en Latinoamérica, y particularmente en Bolivia.

El desarrollo de este trabajo implicó un análisis detallado de las diferentes tecnologías disponibles para la producción de biogás utilizando tierra filtrante como sustrato principal. Se evaluaron distintas configuraciones de digestores anaeróbicos, sistemas de pretratamiento del material, así como tecnologías de generación eléctrica a partir del biogás, considerando motores de combustión interna. Además, se aplicó una metodología de análisis de decisión multicriterio (*MCDA*) para estudiar la factibilidad técnica, económica, ambiental y social del sistema propuesto.

La estructura del presente trabajo se ha organizado de manera que permita una comprensión integral del estudio. En primer lugar, la Introducción, donde se presenta una descripción general del uso de tierra filtrante, su situación actual como resultante de procesos industriales, así como su potencial energético para la producción de biogás. Se presenta, además, el contexto internacional y la necesidad de desarrollar soluciones sostenibles basadas en economía circular. La sección de Desarrollo incluye el análisis de diferentes tecnologías para la producción de biogás a partir de tierra filtrante, describiendo los equipos principales involucrados en el proceso como biodigestores, tanques de mezcla, y generadores eléctricos. También, se exploran los factores que influyen en la eficiencia de conversión energética. La sección de Metodología expone el enfoque de evaluación utilizado, basado en técnicas de Análisis de Decisión Multicriterio (*MCDA*), para considerar criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales. La sección de Resultados presenta los efectos de la aplicación de las diferentes metodologías multicriterio (*AHP*, *TOPSIS* y *ELECTRE*), así como el análisis detallado de cada una de las dimensiones evaluadas: económica, ambiental, social y técnica. Finalmente, en las Conclusiones, se resumen los principales hallazgos del estudio y se proponen recomendaciones para su implementación y escalabilidad.

II. DESARROLLO

A. Análisis de tecnologías y equipos para la generación de biogás a partir de residuos filtrantes

Debido a que la producción de biogás a partir de residuos orgánicos ha demostrado ser una alternativa eficaz para la gestión de desechos y la generación de energía renovable, este estudio se enfocó en el aprovechamiento de la tierra filtrante, un subproducto generado en procesos industriales, entre los que se pueden mencionar la clarificación de aceites y líquidos alimentarios que contienen una alta carga de

materia orgánica susceptible de degradación anaeróbica [4].

Características del sustrato: Tierra Filtrante

La tierra filtrante empleada en procesos industriales suele estar compuesta por materiales como diatomea o bentonita, y tras su uso esta tierra absorbe compuestos orgánicos, aceites y partículas finas que la convierten en un sustrato rico en carbono. Su textura porosa, capacidad de retención de humedad y contenido biodegradable la hacen apta para su uso en biodigestores anaeróbicos [5]. Sus características principales incluyen alto contenido de humedad, lo que le confiere una consistencia semisólida, su composición química incluye materia orgánica, niveles significativos de nitrógeno, fósforo y potasio y se constituye en potencial generador de biogás con un rendimiento estimado de 200–400 m³ por tonelada de sólidos volátiles, con un contenido de metano del 50–60%. Es un residuo renovable, y su aprovechamiento reduce problemas de su disposición final.

Proceso tecnológico y equipos principales

El sistema destinado a la producción de biogás a partir de tierra filtrante involucra una serie de equipos que permiten llevar a cabo el proceso de forma controlada y eficiente. A continuación, se describen los principales componentes empleados:

- **Triturador de tierra filtrante:** su función es reducir el tamaño de las partículas para facilitar su mezcla con agua y mejorar el acceso de los microorganismos a la materia orgánica [6].
- **Tanque de mezcla y agitación:** en este equipo se prepara la mezcla del sustrato con agua y bacterias anaeróbicas, regulando variables como el pH y la temperatura [7].
- **Biodigestor anaeróbico:** considerado el corazón del sistema, es un reactor cerrado en el que se lleva a cabo la descomposición biológica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. En esta etapa se genera el biogás como producto de la actividad de comunidades microbianas, en particular bacterias metanogénicas, cuya acción convierte los compuestos orgánicos en metano y dióxido de carbono [8].
- **Tanque de almacenamiento de biogás:** es un tanque diseñado para contener el gas producido en el biodigestor hasta su uso. Es fundamental que estos tanques cuenten con un buen sistema de sellado, ya que pérdidas por fugas no solo reducen la eficiencia del sistema, sino que también pueden representar riesgos ambientales [9].
- **Generador eléctrico:** el biogás almacenado se utiliza como combustible en motores de combustión interna o microturbinas lo que permite la generación de energía eléctrica. Existen en el mercado diversos fabricantes como *Weltec*, *Zorg Biogas*, *Guascor Energy* o *Siehe*, que ofrecen soluciones modulares y escalables, adecuadas tanto para pequeños proyectos rurales como para instalaciones industriales de mayor envergadura [10].

B. Conversión energética de tierra filtrante a biogás

La conversión energética de tierra filtrante en biogás puede explicarse como un proceso de digestión anaeróbica, en el cual la materia orgánica presente en este subproducto industrial es degradada por comunidades microbianas en condiciones controladas de ausencia de oxígeno. El resultado principal de este proceso es la generación de una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), conocida como biogás.

El proceso se estructura en una serie de fases bioquímicas sucesivas, cada una de ellas catalizada por grupos específicos de microorganismos que actúan en conjunto dentro del biodigestor. A continuación, se describen las etapas que conforman la conversión energética:

- **Pretratamiento físico-químico (opcional):** previo al ingreso al biodigestor, la tierra filtrante puede someterse a un proceso de trituración y homogenización, que mejora la superficie específica del sustrato y facilita la actividad enzimática. Además, se ajustan parámetros como el pH y la temperatura, estableciendo condiciones óptimas para una digestión mesofílica (35–38 °C) o termofílica (50–55 °C), dependiendo del diseño del sistema [11].
- **Hidrólisis:** en esta etapa, las macromoléculas orgánicas complejas como los carbohidratos, lípidos y proteínas se descomponen en compuestos más simples como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos, que serán utilizados por otras bacterias en las etapas siguientes [12].
- **Acidogénesis:** los productos solubles de la hidrólisis son transformados por bacterias acidogénicas en ácidos grasos volátiles (AGVs), alcoholes, amoníaco, hidrógeno molecular (H₂) y CO₂. Esta fase establece la base para la producción posterior de metano [13].

- **Acetogénesis:** durante la acetogénesis, los AGVs de cadena larga se convierten en ácido acético, H_2 y CO_2 , generando los sustratos directos para las arqueas metanogénicas [14].
- **Metanogénesis:** finalmente, arqueas especializadas convierten el ácido acético y la mezcla H_2/CO_2 en metano (CH_4), el componente energético del biogás. Esta etapa es altamente sensible a cambios de temperatura, pH y a la presencia de compuestos tóxicos o inhibidores [15].

Cuando se utiliza tierra filtrante con un contenido de materia orgánica seca, entre 40% y 60%, el rendimiento teórico de biogás puede oscilar entre 200 y 350 m^3 por tonelada de materia seca, dependiendo de la composición del sustrato y del sistema de digestión empleado [16]. El biogás obtenido tiene un poder calorífico entre 5,5 y 6,5 kWh/m^3 , variando según la proporción de metano presente (por lo general entre 50% y 70%) [17]. Si se emplea para generación eléctrica mediante motores de combustión interna o microturbinas, con eficiencias promedio del 35% al 40%, el rendimiento eléctrico puede alcanzar hasta 600 $kWh/tonelada$ [18].

C. Panorama de la tierra filtrante en Bolivia

En Bolivia, la tierra filtrante, también conocida como tierra de blanqueo o diatomita, tiene un uso extendido en diversas industrias, en especial en la refinación de aceites vegetales. Este material, compuesto principalmente por arcillas activadas como bentonita y montmorillonita, posee destacadas propiedades adsorbentes, lo que permite remover impurezas, pigmentos y olores indeseables durante el proceso de tratamiento de aceites [19].

Entre los sectores industriales en Bolivia que son responsables mayormente de la generación de estos residuos se destacan:

- **Industria aceitera:** las plantas procesadoras de aceites comestibles, especialmente aquellas que trabajan con soya, utilizan grandes volúmenes de tierra de blanqueo en sus procesos de refinación. Investigaciones recientes señalan que algunas de estas fábricas mezclan la tierra de blanqueo usada con carbón activado y aceites de pescado [20].
- **Fabricantes de filtros industriales:** empresas como *Sobofil SRL*, enfocadas en la producción de filtros, también generan residuos de tierra filtrante, tanto en la fabricación de componentes como durante las tareas de mantenimiento de sus sistemas de filtrado.
- **Distribuidores de diatomita:** firmas como *Química Industrial Bolivia* comercializan diatomita en polvo destinada a procesos de filtración en distintas industrias.

Como se puede apreciar, los sectores mencionados representan una fuente significativa y constante de residuos de tierra filtrante que, con el tratamiento y aprovechamiento adecuados, podrían ser transformados en insumos valiosos para la generación de biogás. Esta situación no solo abre oportunidades para el desarrollo de tecnologías energéticas limpias en Bolivia, sino que también plantea la necesidad de establecer alianzas estratégicas entre el sector productivo y el energético.

III. METODOLOGÍA

El proceso metodológico se estructuró en tres fases principales y complementarias: análisis técnico-operativo, evaluación multicriterio y análisis de viabilidad.

En la Tabla 1 se presenta, en forma diferenciada, cada uno de los aspectos tratados en el desarrollo de la investigación. Como se podrá apreciar, el estudio se inició con la búsqueda de contacto con personas relacionadas con la industria y el gobierno. Posteriormente, se realizaron entrevistas con expertos del área; producto de esas entrevistas se identificó el lugar con alta producción de tierra filtrante. Luego, se propuso un diseño de la planta, se realizó la viabilidad técnica y la evaluación multicriterio.

Tabla 1. Proceso metodológico

PLANIFICACIÓN	Mes								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Contacto inicial en Bolivia (Gobierno e industria)	■	■							
Identificación de lugar con producción de tierra filtrante en Bolivia		■	■						
Recolección de información técnica y entrevistas con expertos		■	■	■					
Diseño preliminar de planta piloto con biogás				■	■	■			
Implementación de evaluación multicriterio (AHP, TOPSIS, ELECTRE)					■	■	■		
Análisis de viabilidad técnica, económica, social y ambiental						■	■	■	
Propuesta de implementación en Santa Cruz de la Sierra							■	■	■

Fuente: propia

A. Diseño técnico de la planta

Se realizó el dimensionamiento preliminar de los componentes principales: triturador de tierra filtrante, tanque de mezcla, biodigestor anaeróbico, sistema de almacenamiento de biogás y generador eléctrico. El diseño se basó en parámetros como el tiempo de retención hidráulica (HRT), la carga orgánica, la temperatura de operación y la eficiencia del generador. Se consideraron tecnologías comerciales disponibles en el mercado nacional boliviano e internacional, así como experiencias previas con sustratos de características similares.

Este estudio se orientó en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, específicamente en el área del Complejo San Miguel de los Junos, como escenario de referencia para la posible implementación de una planta de biogás. Esta elección se fundamenta en varios aspectos:

- **Disponibilidad de materia prima:** Santa Cruz concentra una elevada generación de residuos sólidos y agroindustriales, lo que asegura un flujo constante de sustratos orgánicos aptos para la producción de biogás.
- **Infraestructura existente:** En esta región se está desarrollando la primera Planta de Tratamiento Mecánico y Biológico de Residuos Sólidos del país, la cual incorpora procesos de tratamiento anaeróbico y aeróbico, sentando un precedente tecnológico y operativo que facilita la incorporación de sistemas de valorización energética.
- **Factores estratégicos:** Santa Cruz de la Sierra es el principal polo industrial y económico de Bolivia, lo que asegura condiciones favorables de mercado, logística y articulación con actores institucionales y privados.
- **Enfoque en sostenibilidad:** La iniciativa local de aprovechar los residuos como fuente energética está alineada con los principios de economía circular, contribuyendo a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y al manejo integral de desechos urbanos e industriales.

La elección de Santa Cruz no es aleatoria, sino que responde a un criterio metodológico que combina disponibilidad de recursos, capacidad tecnológica instalada, potencial energético y contexto institucional favorable, lo cual convierte a este lugar en un caso representativo y replicable para la evaluación multicriterio aplicada en este trabajo.

En general, es relevante destacar que Bolivia presenta una alta generación de residuos agroindustriales, particularmente en la región de Santa Cruz de la Sierra, lo que la convierte en un entorno adecuado para evaluar la viabilidad de proyectos de valorización energética. Por otro lado, este país se encuentra actualmente impulsando iniciativas de tratamiento de residuos con fines energéticos, lo que presenta un ecosistema institucional y técnico favorable para este tipo de investigaciones.

Adicionalmente, la participación de los autores en proyectos internacionales se enmarca en una agenda de investigación aplicada a nivel latinoamericano, donde la búsqueda de casos de estudio en distintos países es fundamental para validar la escalabilidad y transferibilidad de las metodologías propuestas.

Desde un punto de vista profesional, la experiencia de uno de los autores en el sector energético, desempeñándose en cargos de Gerente Comercial para Latinoamérica, facilitó el contacto con actores industriales y de gobierno en Bolivia, permitiendo articular entrevistas y recopilación de información de campo.

De manera que la selección de Bolivia no responde únicamente a una motivación geográfica, sino a una decisión metodológica orientada a garantizar la relevancia práctica, la disponibilidad de datos primarios y la aplicabilidad de los resultados en contextos de economías emergentes en América Latina.

En la Figura 1, se muestra la ubicación de San Miguel de los Junos, lugar en el cual se podría desarrollar una planta bajo el criterio propuesto en esta investigación.



Fig. 1. Mapa de geolocalización del área de estudio.

Fuente: Google maps.

B. Evaluación multicriterio

Con el fin de respaldar la toma de decisiones, se aplicó una metodología de Análisis de Decisión Multicriterio (MCDM), considerando cuatro dimensiones clave:

- **Dimensión Económica:** incluye los costos de inversión, operación, logística, y el análisis de rentabilidad.
- **Dimensión Ambiental:** considera el impacto positivo de la reducción de residuos, disminución de emisiones y valorización de desechos orgánicos.
- **Dimensión Social:** incluye la generación de empleo, la participación comunitaria, la mejora de la calidad de vida y los beneficios educativos o sanitarios.
- **Dimensión Técnica:** analiza la viabilidad tecnológica, madurez de los procesos, confiabilidad operativa y la disponibilidad de recursos técnicos.

Cada dimensión fue evaluada según los métodos de decisión **AHP** (*Analytic Hierarchy Process*), **TOPSIS** (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) y **ELECTRE** (*Elimination and Choice Expressing Reality*), obteniendo una valoración normalizada (de 0 a 1) para efectos de comparación de los resultados.

Los resultados de estas herramientas fueron contrastados y validados con información técnica y, adicionalmente, mediante entrevistas exploratorias a 10 expertos en biogás y energías renovables en Bolivia. Los entrevistados incluyeron representantes de:

- SAGUAPAC (Santa Cruz, gestión de biogás en plantas de tratamiento),

- Ingeniería y Biogás S.L. (empresa de ingeniería especializada en sistemas de combustión y extracción de biogás),
- Proyecto *Waste-to-Biogas in Bolivia* (La Paz, iniciativa de valorización de residuos urbanos),
- Viceministerio de Energías Alternativas,
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua.

Las entrevistas, de carácter semiestructurado, tuvieron como propósito:

- (i) Validar los supuestos técnicos sobre la producción de biogás a partir de tierra filtrante.
- (ii) Evaluar la viabilidad logística y económica del proyecto en Bolivia.
- (iii) Recoger percepciones sobre los impactos sociales y ambientales.

La metodología aplicada combinó preguntas abiertas y escalas de valoración cualitativa-cuantitativa, lo que permitió triangular los resultados con la información obtenida en la aplicación de los métodos AHP, TOPSIS y ELECTRE.

Las entrevistas fueron abiertas, con respuestas espontáneas y de carácter puramente profesional. El objetivo principal fue identificar los lugares más adecuados en Bolivia para la generación y aprovechamiento de tierra filtrante, así como conocer las industrias que generan dicho material. Además, se investigó la cantidad de material producido por día, mes y año en las plantas analizadas y en las regiones identificadas, con el fin de determinar si la producción era constante o estacional.

También se consultó sobre la existencia de registros de laboratorio que indiquen el contenido de materia orgánica en la tierra filtrante. En caso afirmativo, se solicitó información sobre los promedios de:

- Sólidos Totales (ST),
- Sólidos Volátiles (SV),
- Potencial metanogénico (BMP test),
- Contenido total de nitrógeno (N),
- Relación carbono/nitrógeno (C/N),
- Nivel de humedad (%),
- Presencia de contaminantes o inhibidores que puedan afectar la digestión anaerobia.

Otro punto de interés fue conocer la demanda eléctrica y térmica en el entorno donde se produce la tierra filtrante, así como la existencia de infraestructura eléctrica para inyectar energía a la red pública. Asimismo, se indagó sobre la percepción de los expertos acerca de la importancia del aprovechamiento del biogás para:

- Generación eléctrica,
- Producción de calor de proceso,
- Obtención de biometano.

Además, se recopiló información sobre la distancia promedio entre las plantas que generan tierra filtrante y los posibles sitios de instalación de biodigestores, la capacidad de almacenamiento y pre-tratamiento actual, así como las barreras técnicas y/o regulatorias que podrían dificultar la implementación de un proyecto de biogás basado en este tipo de residuo.

C. *Análisis de viabilidad*

La investigación sobre la generación de biogás a partir de tierra filtrante en Bolivia presentó distintos niveles de factibilidad, evaluados según cuatro dimensiones:

- **Técnica:** viable, ya que la tecnología propuesta (biodigestores, tanques, generadores eléctricos) está disponible en el mercado y validada en proyectos similares. Sin embargo, la logística de acopio y suministro continuo de tierra filtrante constituye un reto operativo.
- **Económica:** limitada, debido a los altos costos de inversión y operación frente a la generación estimada de 874 kWe. Se requiere apoyo mediante incentivos, subsidios o la co-digestión con otros residuos agroindustriales que permitan mejorar la escala del proyecto.
- **Ambiental:** altamente favorable, pues reduce emisiones de gases de efecto invernadero, evita la disposición inadecuada de residuos y genera digestato con valor como biofertilizante, alineándose con la economía circular y el Acuerdo de París.
- **Social:** positiva, dado que promueve empleo local, fortalece capacidades comunitarias y mejora la gestión de residuos en zonas rurales. La aceptación dependerá de la integración con programas de desarrollo local.

En síntesis, se puede afirmar que el trabajo resultó técnica, ambiental y socialmente viable, aunque condicionado económicamente a la existencia de políticas de apoyo, esquemas de financiamiento o estrategias de escalamiento que permitan mejorar su rentabilidad.

IV. RESULTADOS

Los resultados obtenidos de las evaluaciones de la Dimensión Económica, la Dimensión Ambiental, la Dimensión Social y la Dimensión Técnica, a través de los métodos AHP, TOPSIS y ELECTRE, fueron los siguientes: en la dimensión económica se alcanzaron valores de 0,15 (AHP), 0,20 (TOPSIS) y 0,18 (ELECTRE); en la *dimensión ambiental* se obtuvieron 0,35 (AHP), 0,40 (TOPSIS) y 0,38 (ELECTRE); en la *dimensión social*, 0,27 (AHP), 0,22 (TOPSIS) y 0,24 (ELECTRE); y en la *dimensión técnica*, 0,23 (AHP), 0,18 (TOPSIS) y 0,20 (ELECTRE). Estos valores fueron contrastados y validados mediante las entrevistas a expertos en biogás y energías renovables en Bolivia.

Con respecto al aspecto ambiental, esta dimensión obtuvo las mayores puntuaciones en todos los enfoques, reflejando la fuerte contribución del proyecto a la sostenibilidad a través de la gestión de residuos, la reducción de GEI y el aprovechamiento de subproductos como la tierra filtrante. Por lo tanto, es un componente de alto valor agregado en este tipo de proyectos. La producción de biogás permite mitigar impactos ambientales asociados a la disposición inadecuada de residuos agrícolas, como lixiviados y gases contaminantes. Además, la digestión anaerobia reduce la carga orgánica y genera un digestato que puede ser aprovechado como biofertilizante. Esta cadena de beneficios ambientales posiciona el proyecto como una estrategia efectiva dentro de una economía circular y baja en carbono.

De acuerdo con la dimensión técnica, el proyecto presenta robustez tecnológica, confiabilidad y claridad en su diseño, según la escala, aunque afronta un reto logístico para el abastecimiento de materia prima. Aun así, se considera factible desde el punto de vista técnico. Las tecnologías consideradas para la digestión anaerobia y la generación de energía han sido validadas en proyectos similares, lo cual disminuye el riesgo de fallas operativas. No obstante, aspectos como el suministro continuo de tierra filtrante, la calidad del biogás producido y la gestión del digestato deben ser optimizados para asegurar eficiencia y durabilidad.

En cuanto a la dimensión social, con una valoración ligeramente superior a la técnica y a la económica, mostró que el proyecto tendrá un impacto positivo en las comunidades locales, ya que genera empleo, promueve inclusión rural, mejora condiciones sanitarias y puede integrarse a modelos de desarrollo local. En estudios internacionales, este criterio es cada vez más relevante. La inclusión de actores locales en la recolección de sustrato, operación y mantenimiento del sistema permite fortalecer el tejido social y generar capacidades técnicas en la comunidad. Además, al mejorar las condiciones de salud pública mediante el manejo adecuado de residuos, se reducen enfermedades y se promueve una mayor calidad de vida. Estos factores refuerzan la aceptación y sostenibilidad social del proyecto a largo plazo.

La dimensión económica obtuvo la menor puntuación en los tres métodos. A pesar del potencial técnico y ambiental, los costos totales del proyecto (diseño, construcción, logística y puesta en marcha) son elevados en comparación con la generación esperada de 874 kWe. Por lo tanto, al no superar el umbral de 1 MW, la rentabilidad económica resulta limitada, haciendo que el proyecto no sea viable

financieramente sin subsidios o escalamiento. Este resultado refleja la realidad de muchos proyectos energéticos a pequeña escala que, aunque sostenibles en lo técnico y ambiental, no logran cubrir el retorno esperado sin apoyos externos.

Por ejemplo, en Etiopía, las plantas domésticas de 6 m³ y 8 m³ recuperan su costo de instalación en menos de un año solo si reciben subsidios; sin ellos, los plazos se alargan significativamente. De manera similar, en Eslovenia se concluyó que las microplantas de hasta 250 kW no son económicamente viables sin subvenciones, lo cual pone en evidencia la necesidad de políticas de incentivo o mecanismos financieros innovadores en contextos rurales o semidesarrollados.

En la Tabla 2 y en la Figura 2, se resumen los resultados del estudio, ilustrando de manera comparativa las puntuaciones normalizadas obtenidas en cada dimensión a través de los métodos AHP, TOPSIS y ELECTRE.

Tabla 2. Resultados normalizados por dimensión y método

Dimensión	AHP	TOPSIS	ELECTRE
Económica	0,15	0,20	0,18
Ambiental	0,35	0,40	0,38
Social	0,27	0,22	0,24
Técnica	0,23	0,18	0,20

Fuente: elaboración propia.

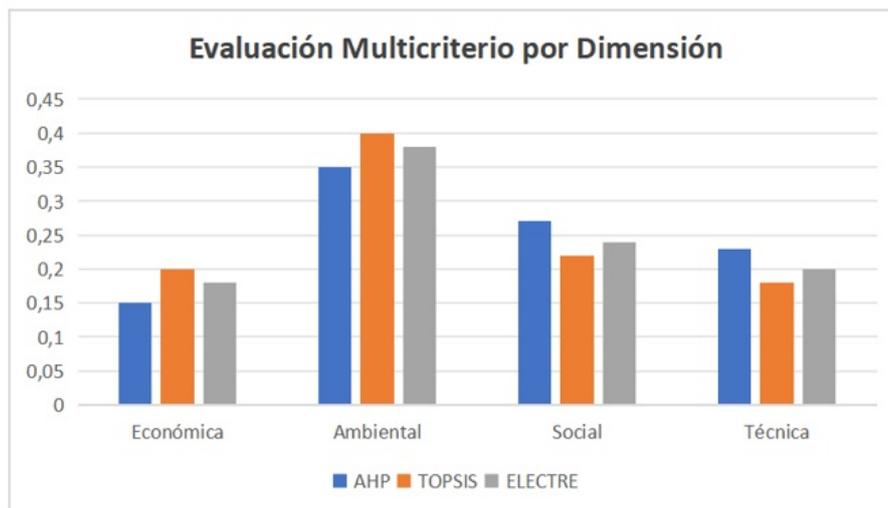


Fig. 2. Gráfica de Evaluación Multicriterio por Dimensión.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

A partir del análisis multicriterio desarrollado, se puede afirmar que el estudio desarrollado posee fortalezas sólidas en las dimensiones ambiental, social y técnica, y que el único factor limitante para su implementación es la viabilidad económica, restringida por los altos costos y la baja escala de producción energética alcanzada.

Este trabajo abordó el estudio de la tecnología de digestión anaerobia aplicada a tierra filtrante, evaluando no solo el diseño técnico sino también su contexto de implementación en Bolivia. El país presenta un gran potencial en la producción agrícola e industrial, lo que genera residuos aprovechables para fines energéticos; no obstante, también enfrenta retos estructurales, como el acceso limitado a financiamiento, la falta de incentivos energéticos y las barreras logísticas en zonas rurales.

El enfoque aplicado permitió visibilizar que, si bien el proyecto no resulta económicamente rentable con los parámetros actuales, su impacto social y ambiental es considerable. En Bolivia, donde muchas

comunidades carecen de acceso confiable a la energía, este tipo de soluciones puede representar una alternativa descentralizada, limpia y adaptada al entorno local.

Comparado con proyectos internacionales, donde el biogás se produce a partir de residuos agroindustriales de mayores volúmenes (como estiércol o *POME*), este estudio demuestra que, aun con subproductos menos convencionales como la tierra filtrante, se puede alcanzar un rendimiento técnico aceptable. No obstante, en esos contextos la rentabilidad mejora por el acceso a subvenciones, infraestructura y escalas más grandes. Por lo tanto, para mejorar la viabilidad del proyecto, se recomienda explorar opciones como la combinación de sustratos, alianzas con industrias locales para el acopio de materia prima y la aplicación de políticas públicas orientadas a promover energías renovables mediante subsidios, tarifas diferenciadas o financiamiento blando.

Finalmente, se puede afirmar que este estudio demuestra la importancia de integrar criterios sociales, ambientales, técnicos y económicos al momento de evaluar proyectos energéticos, especialmente en países en desarrollo como Bolivia, para maximizar su impacto y sostenibilidad.

REFERENCIAS

- [1] G. Bochmann, "Anaerobic digestion of pretreated industrial residues and integration of residues from sugar cane," *Environmental Microbiology and Biotechnology*, 2020, disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7318785/>.
- [2] M. J. B. Kabeyi and O. A. Olanrewaju, "Biogas production and applications in the sustainable energy transition," *Journal of Energy*, vol. 2022, pp. 1–22, 2022.
- [3] O. H. P. Cuervo, C. A. Rosas, and G. P. Romanelli, "Valorization of residual lignocellulosic biomass in south america: a review," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, pp. 44 575–44 607, 2024.
- [4] FAO, "Producción sostenible de biogás a partir de residuos agroindustriales," FAO.org, 2024, disponible en: <https://www.fao.org/3/ca9286es/ca9286es.pdf> (Accedido: Ago. 5, 2024).
- [5] R. Toledo and M. Rivas, "Caracterización de la tierra de filtración usada en procesos industriales y su potencial energético," *Revista de Tecnología Ambiental*, vol. 12, no. 1, pp. 45–52, 2024.
- [6] S. Rodríguez and L. Vargas, "Optimización del pretratamiento de residuos orgánicos para la producción de biogás," *Revista Ingeniería y Energía*, vol. 8, no. 2, pp. 112–119, 2024.
- [7] J. Méndez and R. García, "Control de parámetros en digestores anaerobios: influencia del pH y la agitación," *BioTecnología Aplicada*, vol. 10, no. 3, pp. 77–84, 2024.
- [8] A. Ortega and M. Solís, "Procesos microbianos en digestión anaerobia y producción de metano," *Ciencia Ambiental y Energía*, vol. 6, no. 1, pp. 53–60, 2024.
- [9] G. Núñez, "Tanques de almacenamiento de biogás: diseño y seguridad ambiental," *Revista Técnica de Energías Renovables*, vol. 5, no. 4, pp. 33–40, 2024.
- [10] Welltec, Zorg Biogas, Guascor Energy, and Siever, "Soluciones comerciales para generación eléctrica a partir de biogás," Catálogos técnicos de fabricantes, 2023.
- [11] R. López and P. Contreras, "Efecto del pretratamiento físico-químico en la eficiencia de digestión anaerobia de residuos orgánicos," *Revista de Energías Alternativas*, vol. 11, no. 2, pp. 66–74, 2024.
- [12] G. Herrera and S. Vega, "Hidrólisis de macromoléculas en digestores anaeróbicos: fundamentos y avances," *Ingeniería Bioquímica Aplicada*, vol. 7, no. 1, pp. 25–31, 2024.

- [13] M. Franco and D. Suárez, "Procesos de acidogénesis y formación de ácidos grasos volátiles en biodigestores," *Ciencia y Tecnología Ambiental*, vol. 14, no. 3, pp. 40–48, 2024.
- [14] E. Paredes, "Mecanismos bioquímicos de la acetogénesis en digestión anaerobia," *Revista de Energía y Medio Ambiente*, vol. 6, no. 2, pp. 55–61, 2024.
- [15] C. Jiménez and A. León, "Conversión de ácidos acéticos a metano en digestores anaerobios," *Bioteología Energética*, vol. 5, no. 4, pp. 33–39, 2024.
- [16] T. Delgado and H. Fuentes, "Estimación del rendimiento teórico de biogás en función de la materia orgánica del sustrato," *Revista de Bioenergía y Recursos Orgánicos*, vol. 9, no. 1, pp. 20–27, 2024.
- [17] C. Morales and J. Pérez, "Valor energético del biogás y su relación con la proporción de metano," *Revista Latinoamericana de Energía Renovable*, vol. 13, no. 2, pp. 58–65, 2024.
- [18] A. Castro and L. Jiménez, "Conversión del biogás a energía eléctrica mediante micro-turbinas y motores de combustión," *Energía y Tecnología Sostenible*, vol. 10, no. 1, pp. 41–48, 2024.
- [19] R. Córdova and M. Salazar, "Uso de tierras de blanqueo en la refinación de aceites y su potencial energético en bolivia," *Revista Boliviana de Procesos Industriales*, vol. 7, no. 3, pp. 22–30, 2024.
- [20] Instituto Boliviano de Tecnología Industrial, "Estudio sobre el manejo de residuos de tierra de blanqueo en la industria aceitera nacional," IBTI, Tech. Rep. IBTI-2022, 2022.