



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS CAMPUS V



**Sistema de purificación de biogás de bajo costo en biodigestores
tubulares en Villaflores, Chiapas**

TESIS

**que para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA
TROPICAL**

Presenta

JESÚS EMILIANO CASTELLANOS SÁNCHEZ F131042

Director de tesis

DR. JOSÉ APOLONIO VENEGAS VENEGAS

Codirector

DR. FIDEL ALEJANDRO AGUILAR AGUILAR

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

Febrero, 2024



Villaflores, Chiapas
30 de noviembre de 2023
Oficio N° FCACV/D/1222/23

MVZ. JESÚS EMILIANO CASTELLANOS SÁNCHEZ
MAESTRANTE EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS *CAMPUS V*
P R E S E N T E.

En atención a que usted ha presentado los votos aprobatorios del Honorable Jurado designado para su evaluación de posgrado, de la tesis titulada: **“Sistema de purificación de biogás de bajo costo en biodigestores tubulares en Villaflores, Chiapas”**, por este conducto le comunico que se le autoriza la impresión del documento, de acuerdo a los lineamientos vigentes de la Universidad.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR”

M. C. CARLOS ALBERTO ALBERQUEZ SANABRIA
DIRECTOR

FACULTAD DE
CIENCIAS AGRONÓMICAS



C. c. p. Archivo

CAVS*marh.



Código: FO-113-05-05

Revisión: 0

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) Jesús Emiliano Castellanos Sánchez, Autor (a) de la tesis bajo el título de "Sistema de purificación de biogás de bajo costo en biodigestores tubulares en Villaflores, Chiapas" presentada y aprobada en el año 2024 como requisito para obtener el título o grado de Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical, autorizo licencia a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), para que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para su consulta, reproducción parcial y/o total, citando la fuente, que contribuya a la divulgación del conocimiento humanístico, científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 30 días del mes de enero del año 2024.

Jesús Emiliano Castellanos Sánchez

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

DEDICATORIA

Mi Tesis la dedico con todo mi amor y cariño a mi esposa Maribel Hernández por su sacrificio y esfuerzo, por ser mi apoyo, mi fuerza, por creer en mi capacidad, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre ha estado brindándome su comprensión, cariño y amor.

A mis hijos Ezequiel e Illán por ser mis motores e impulso para superar cada obstáculo y adversidades.

A mis padres, que con sus enseñanzas y educación me han forjado como buen hijo.

A mi querido amigo el Dr. Eliseo, que, con sus consejos he sobrellevado las caídas, gracias por el acompañamiento.

Jesús Emiliano Castellanos Sánchez

AGRADECIMIENTOS

Dios, por darme la vida y guiarme por el sendero del bien, siendo la lámpara para mis pasos. A mi director de tesis el Dr. José Apolonio Venegas Venegas, por brindar su tiempo, sus enseñanzas y conocimientos científicos, por ser parte de mi formación profesional y confiar desde un principio, cuando todo parecía terminado.

Al Dr. Fidel Alejandro Aguilar Aguilar, por ser más que un codirector de tesis, un gran ser humano, sin su apoyo no hubiera sido posible este logro académico.

Al Dr. Deb por su experiencia, comprensión y paciencia que contribuyeron a mi experiencia profesional y gratificante camino de la investigación.

Al CONAHCYT, por otorgarme la beca y cursar esta maestría.

A los integrantes del Cuerpo Académico consolidado de Agroforestería Pecuaria, por darme el respaldo y crecimiento profesional.

A la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas y el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables a cargo del Dr. Pascual López de Paz y del Maestro Oscar Martínez Aguirre.

A mis compañeros de generación, por el apoyo brindado en cada momento de este proceso formativo profesional.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS CAMPUS V



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL

Esta tesis titulada SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS DE BAJO COSTO EN BIODIGESTORES TUBULARES EN VILLAFLORES, CHIAPAS realizada por el MVZ. JESÚS EMILIANO CASTELLANOS SÁNCHEZ, bajo la dirección y asesoría del Comité Tutorial indicado, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL.

COMITÉ TUTORIAL

DIRECTOR


DR. JOSÉ APOLONIO VENEGAS VENEGAS

CODIRECTOR


DR. FIDEL ALEJANDRO AGUILAR AGUILAR

(INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL)

ASESOR

DR. DEB RAJ ARYAL





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS CAMPUS V



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL

Esta tesis titulada SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS DE BAJO COSTO EN BIODIGESTORES TUBULARES EN VILLAFLORES, CHIAPAS realizada por el MVZ. JESÚS EMILIANO CASTELLANOS SÁNCHEZ, ha sido aprobada por la Comisión Revisora indicada, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL.

COMISIÓN REVISORA

DR. JOSÉ APOLONIO VENEGAS VENEGAS

DR. FIDEL ALEJANDRO AGUILAR AGUILAR
(INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL)

DR. DEB RAJ ARYAL

Three handwritten signatures in blue ink, each positioned above a horizontal line. The signatures are: 1. José Apolonio Venegas Venegas, 2. Fidel Alejandro Aguilar Aguilar, and 3. Deb Raj Aryal.

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.1.1 Objetivos específicos.....	2
1.2 Hipótesis	2
1.3 Justificación	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Procesos de purificación de biogás: revisión y perspectivas	4
2.2 Propiedades fisicoquímicas y aplicaciones del metano	6
2.3 Métodos de eliminación de CO ₂ y H ₂ S	9
2.4 Método físico	10
2.4.1 Eliminación de CO ₂	10
2.4.2 Eliminación de H ₂ S	14
2.5 Método químico	16
2.5.1 Eliminación de CO ₂	16
2.5.2 Eliminación de H ₂ S	19
2.6 Método biológico.....	22
2.6.1 Eliminación de CO ₂	22
2.6.2 Eliminación de H ₂ S	25
2.7 Ventajas y desventajas de los procesos	29

2.8	Perspectivas futuras	30
2.9	Determinación de costos	32
2.9.1	Costo de inversión.....	32
2.9.2	Costo de operación	32
2.9.2.1	Costos variables.....	32
2.9.2.2	Costos fijos	33
2.9.3	Depreciación anual.....	33
2.9.4	Costos económicos	33
2.9.5	Costo de la mano de obra del productor o familiar	34
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
3.1	Localización del área de estudio	34
3.2	Materiales	35
3.3	Herramientas	36
3.4	Enfoque metodológico	36
3.4.1	Activación de biodigestor anaerobio y caracterización del biogás.....	36
3.4.2	Diseño experimental	37
3.4.3	Construcción de filtros y preparación de reactivos	38
3.4.4	Proceso de purificación de biogás	40
3.4.5	Evaluación de la capacidad de absorción	42
3.4.6	Cálculo del volumen de CO ₂ de acuerdo con el biogás producido.	42
3.4.7	Evaluación de la capacidad de absorción del sistema A.....	42
3.4.8	Evaluación de la capacidad de absorción del sistema B.....	43
3.4.9	Evaluación de la capacidad de absorción del sistema C.....	44
3.4.10	Evaluación de la capacidad de absorción del sistema Cal sodada	45
3.4.11	Costos en los sistemas de purificación de biogás.....	45
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47

5. CONCLUSIONES	53
6. LITERATURA CITADA	54

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de combustibles líquidos y gaseosos (Casanova <i>et al.</i> , 2018; Mollah <i>et al.</i> , 2015; Noor <i>et al.</i> , 2014; World Nuclear Association, 2018)	8
Cuadro 2. Comparación del método de absorción física para la eliminación de CO ₂ .	13
Cuadro 3. Comparación del método por absorción física para la eliminación de H ₂ S.	16
Cuadro 4. Comparación del método de absorción química para la eliminación de CO ₂	18
Cuadro 5. Comparación del método de adsorción química para la eliminación de H ₂ S.	21
Cuadro 6. Comparación del método biológico para la eliminación de CO ₂	25
Cuadro 7. Bacterias aeróbicas y anaeróbicas en la purificación de biogás.	26
Cuadro 8. Comparación del método biológico para la eliminación de H ₂ S.	28
Cuadro 9. Ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías de purificación de biogás.	29
Cuadro 10. Combinación de altura y peso de Ca(OH) ₂ para los sistemas de purificación.....	37
Cuadro 11. Análisis de varianza.....	47
Cuadro 12. Medias de los sistemas de purificación	47
Cuadro 13. Prueba de Tukey y una confianza de 95%	48
Cuadro 14. Comparación de reactivos en la recuperación de metano y eliminación de impurezas	49
Cuadro 15. Capacidad de absorción de los sistemas de purificación.....	49
Cuadro 16. Costo de purificación de 1 m ³ de biogás.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura molecular del metano, modificada de (Moron, 2018).....	7
Figura 2. Usos del biogás y el metano, modificado de (Ely <i>et al.</i> , 2016).....	9
Figura 3. Métodos de purificación para la eliminación de CO ₂ y H ₂ S por motivos físicos, químicos o biológicos.....	10
Figura 4. Esquema general de la absorción física de CO ₂ con el uso de agua, modificado de (Barrera-Cardoso <i>et al.</i> , 2018).	11
Figura 5. Ilustración de las implicaciones para el crecimiento de microalgas, modificada de Płaczek <i>et al.</i> (2017)	22
Figura 6. Localización del área de estudio	35
Figura 7. Colaboración institucional y herramientas de trabajo	37
Figura 8. Preparación de óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	39
Figura 9. Proceso de purificación de biogás: (1) biodigestor, (2) filtro Fe ₂ O ₃ para eliminar H ₂ S, (3, 4, 5) filtros con Ca(OH) ₂	41
Figura 10. Proceso de purificación de biogás: (1) Flujo de biogás, (2) filtro Fe ₂ O ₃ para eliminar H ₂ S, (3) filtro con Ca(OH) ₂	41

RESUMEN

El biogás, una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S), se presenta como una valiosa fuente de energía renovable. Sin embargo, las impurezas presentes en el biogás, como el H_2S y el CO_2 , presentan desafíos significativos. El H_2S puede ocasionar daños corrosivos en los equipos fabricados con materiales ferrosos, mientras que la presencia de CO_2 en una proporción del 30 al 45% disminuye el potencial calorífico del biogás, afectando su eficacia energética. Por lo tanto, la eliminación de estas impurezas se convierte en un paso crucial para mejorar la calidad y utilidad del biogás como fuente de energía sostenible. El propósito central de este estudio radicó en la evaluación de sistemas de purificación de biogás en biodigestores rurales ubicados en Villaflores, Chiapas. El experimento se diseñó empleando un enfoque de muestreo completamente al azar, considerando variables como la altura del filtro (expresada en centímetros) y la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de calcio) utilizado como agente purificador (medido en gramos). Se evaluaron cuatro sistemas de purificación distintos: A (20 cm y 700 g), B (40 cm y 1880 g), C (60 cm y 2880 g) y un sistema de referencia utilizando un medio filtrante comercial. Los resultados destacaron la efectividad del sistema de referencia, que logró una eficiencia de purificación sobresaliente con un 97.6% de recuperación de CH_4 y una eliminación completa de CO_2 y H_2S . Asimismo, se analizó la capacidad de absorción de los sistemas de purificación, revelando que el sistema C demostró la mayor capacidad de absorción con 2.076 m^3 de biogás filtrado, logrando la remoción de 0.872 m^3 de CO_2 y generando un volumen de biogás de alta calidad final de 1.204 m^3 . En términos económicos, se calculó el costo de purificar 1 m^3 de biogás en los sistemas evaluados. Los resultados mostraron que los sistemas A, B y C presentaban costos similares, oscilando entre MXN\$ 6.51 y MXN\$ 6.65 por unidad. En contraste, el medio filtrante comercial demostró un costo significativamente más elevado, alcanzando los MXN\$ 198.60. De los resultados obtenidos en este estudio, se demuestra que el uso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y Fe_2O_3 , son eficientes para la purificación de biogás. Así mismo, los materiales filtrantes son económicos y accesibles en todas las regiones. Este proceso es integral en el tratamiento de residuos orgánicos y sostenible, el cual asegura la prosperidad en las zonas rurales en los países en vías de desarrollo, como lo indica la agenda 2030.

Palabras clave: Biogás, purificación, biometano, sostenible.

ABSTRACT

Biogas, a gaseous mixture composed mainly of methane (CH₄), carbon dioxide (CO₂) and hydrogen sulfide (H₂S), is presented as a valuable source of renewable energy. However, impurities present in biogas, such as H₂S and CO₂, present significant challenges. H₂S can cause corrosive damage to equipment made of ferrous materials, while the presence of CO₂ in a proportion of 30 to 45% decreases the heat potential of biogas, affecting its energy efficiency. Therefore, the removal of these impurities becomes a crucial step to improve the quality and usefulness of biogas as a sustainable energy source. The central purpose of this study was the evaluation of biogas purification systems in rural biodigesters located in Villaflores, Chiapas. The experiment was designed using a completely random sampling approach, considering variables such as filter height (expressed in centimeters) and the amount of Ca(OH)₂ (calcium hydroxide) used as a purifying agent (measured in grams). Four different purification systems were evaluated: A (20 cm and 700 g), B (40 cm and 1880 g), C (60 cm and 2880 g) and a reference system using a commercial filter media. The results highlighted the effectiveness of the reference system, which achieved outstanding purification efficiency with 97.6% CH₄ recovery and complete CO₂ and H₂S removal. Likewise, the absorption capacity of the purification systems was analyzed, revealing that the C system demonstrated the highest absorption capacity with 2,076 m³ of filtered biogas, achieving the removal of 0.872 m³ of CO₂ and generating a volume of high final quality biogas of 1,204 m³. In economic terms, the cost of purifying 1 m³ of biogas in the evaluated systems was calculated. The results showed that systems A, B and C had similar costs, ranging between MXN\$ 6.51 and MXN\$ 6.65 per unit. In contrast, the commercial filter media showed a significantly higher cost, reaching MXN\$ 198.60. From the results obtained in this study, it is demonstrated that the use of Ca(OH)₂ and Fe₂O₃ are efficient for the purification of biogas. Likewise, filter materials are economical and accessible in all regions. This process is integral in the treatment of organic waste and sustainable, which ensures prosperity in rural areas in developing countries, as indicated by the 2030 agenda.

Keywords: Biogas, purification, biomethane, sustainable.

1. INTRODUCCIÓN

El sector ganadero es uno de los generadores de gases de efecto invernadero, principalmente del sector bovino y porcino, esto se presenta por la alta demanda de productos cárnicos y lácteos por parte de la creciente población actual; entre los gases de efecto invernadero que emite este sector, encontramos el metano (CH_4), este gas con un potencial de calentamiento global (PCG) de 25, el cual tiene como consecuencia degradación de la tierra, escasez de agua e inseguridad alimentaria (FAO, 2011; INECC y SEMARNAT, 2015).

Con el propósito de hacer frente al problema que aqueja la emisión de gases de efecto invernadero por el sector pecuario, se plantean estrategias que permitan reducir estas emisiones, una que resulta favorable y amigable con el medio ambiente es la implementación de biodigestores; estos son sistemas diseñados para optimizar la producción de biogás a partir de la biomasa como: los desechos agrícolas, estiércol animal o humano y efluentes industriales, los cuales permiten así la obtención de energía limpia y de bajo costo a partir de una fuente renovable.

Ésta es una tecnología que permite aprovechar y transformar la biomasa en biogás y biofertilizante de manera controlada (Ortega Viera *et al.*, 2015; Scarlat *et al.*, 2018; Severiche y Acevedo, 2013). Actualmente, se hace uso de los biodigestores a pequeña y mediana escala en los sistemas pecuarios, de los cuales se obtiene una producción de biogás que es usada para cocinar en combustión directa. Este gas también puede generar energía eléctrica mediante un motogenerador, usarse en la calefacción de granjas, reemplazar gasolina o el diésel en motores de combustión interna, así como para operar maquinaria agrícola o bombear agua (Arango *et al.*, 2013; Reyes, 2017).

El biogás además del CH_4 contiene impurezas como el ácido sulfhídrico (H_2S) y el dióxido de carbono (CO_2), que disminuyen su poder calorífico. Hay que enfatizar que el H_2S puede causar daños a los equipos como: parilla y gasómetros por corrosión; para evitar esto, el sulfuro de hidrógeno debe removerse del biogás mediante un proceso de filtración (Leitón, 2014; Mendoza, 2015). El poder calorífico del biogás es determinado por la fracción del metano (biometano) que puede variar entre 50% hasta 80%, de acuerdo con Weber *et al.* (2012) una concentración de biometano del 40% tiene un poder calorífico equivalente a 14.3 MJ m^{-3} (3415 Kcal m^{-3}) y puede alcanzar 28.6 MJ m^{-3} ($6830.99 \text{ Kcal m}^{-3}$) con una concentración de 80% de metano.

La purificación de biogás, es decir, la eliminación de dióxido de carbono y H_2S , se ha realizado mediante tecnologías que permiten la obtención del biometano, mediante varias técnicas, las cuales se clasifican en cinco categorías: absorción (por vía física o química), adsorción (por balance de presión, temperatura o por balance eléctrico), separación por membranas, métodos biológicos y separación criogénica.

Para asegurar la calidad y su uso eficiente hace falta un sistema de purificación que permita mejorar su calidad y rendimiento calorífico, lo cual es posible removiendo el CO₂ y el H₂S (Gómez, 2014).

Por lo expuesto anteriormente, este estudio se centra en la búsqueda de una alternativa de purificación de biogás por medio de un método fisicoquímico utilizando materiales como el óxido de hierro para remover H₂S, y para la absorción del CO₂ el empleo del hidróxido de calcio. Éstos son de fácil acceso y de bajo costo, además considerados amigables con el medio ambiente. Por ello, la investigación tiene como objetivo evaluar sistemas de purificación de biogás en biodigestores de pequeña escala en Villaflores, Chiapas.

1.1 Objetivo general

Evaluar sistemas de purificación de biogás de bajo costo para biodigestores de pequeña escala en Villaflores, Chiapas.

1.1.1 Objetivos específicos

- a) Comparar la eficiencia de purificación en sistemas de filtros de biogás con el uso de Ca(OH)₂.
- b) Evaluar la capacidad de absorción de impurezas de los sistemas de filtros de biogás de acuerdo al peso (g) utilizado de Ca(OH)₂.
- b) Estimar los costos de purificación en los sistemas de filtros de biogás.

1.2 Hipótesis

Con la obtención de un filtro eficiente y sostenible de purificación de biogás es posible el aprovechamiento adecuado y seguro del metano generado en los sistemas pecuarios.

1.3 Justificación

La purificación del biogás es un proceso crítico que involucra la eliminación de impurezas como dióxido de carbono (CO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S), vapor de agua y otros contaminantes. Estas impurezas no solo reducen el poder calorífico del biogás, afectando su eficiencia energética, sino que también pueden causar daños a equipos y componentes en la infraestructura energética, así como impactos negativos en la calidad del aire si se liberan sin tratamiento adecuado. Por lo tanto, la optimización de los procesos de purificación de biogás es crucial por las siguientes razones:

1. **Mejora de la Eficiencia Energética:** La eliminación eficaz de impurezas del biogás aumenta su contenido de metano, el componente principal de valor energético en el biogás. Esto permite un mayor rendimiento energético y lo hace más atractivo como fuente de energía para aplicaciones industriales, comerciales y domésticas.
2. **Reducción de Emisiones:** La purificación del biogás disminuye significativamente las emisiones de gases contaminantes, como el CO₂ y el H₂S. Al producir un biogás más limpio, se contribuye a la mitigación del cambio climático y a la mejora de la calidad del aire local.
3. **Protección de la Infraestructura:** Los contaminantes presentes en el biogás, como el H₂S, pueden corroer y dañar los equipos, y sistemas de distribución de energía. La purificación adecuada prolonga la vida útil de la infraestructura y reduce los costos de mantenimiento.
4. **Diversificación de Fuentes Energéticas:** La optimización de la purificación del biogás puede impulsar su integración en la red de energía existente, complementando otras fuentes renovables y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles.
5. **Promoción de la Economía Circular:** La utilización de residuos orgánicos para la producción de biogás contribuye a la gestión sostenible de los desechos y a la economía circular, cerrando el ciclo de nutrientes y energía.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Procesos de purificación de biogás: revisión y perspectivas

Castellanos-Sánchez J.E^a; Aguilar-Aguilar F.A.^{bc}; R. Hernández-Altamirano ^{bc}, José Apolonio Venegas Venegas^d; Deb Raj Aryal^d

^aFacultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad Autónoma de Chiapas, México;

^b Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto s/n, Col. La Laguna Ticomán, 07340 Ciudad de México, México;

^c Laboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad de Biocombustibles (LaNDACBio), Instituto Politécnico Nacional, 07340 Ciudad de México, México

^d Catedráticos CONAHCYT-UNACH, México.

RESUMEN

El biogás se genera mediante digestión anaeróbica controlada a partir de estiércol animal, aguas residuales, vertederos, industria, agroindustria u otros residuos orgánicos. El biogás se compone principalmente de 60-70% de metano, 30-40% de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno <1%. El CH₄ puro genera aproximadamente 30.67 a 36.68 MJ m⁻³ o 10 Kw m⁻³ de energía, pudiendo competir con los combustibles convencionales. El dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno del biogás disminuyen el potencial energético del metano y dañan los equipos. El biogás purificado podría ser un biocombustible competitivo con los combustibles convencionales. Actualmente, existen muchos métodos físicos, químicos y biológicos de mejora del biogás; eficiente, prometedor y rendimiento superior al 90% del CH₄ recuperado. La mejora del biogás requiere infraestructura costosa y reactivos químicos y genera subproductos que pueden causar problemas ambientales a largo plazo. Por esta razón, los métodos de purificación deben ser exhaustivos y deben contribuir a mejorar la pureza del CH₄ del biogás. Este estudio revisó los métodos más relevantes, las condiciones de operación para eliminar CO₂ y H₂S, así como las ventajas y desventajas de los procesos de purificación de biogás.¹

Palabras clave: biogás, método de purificación, biometano.

¹ Este artículo fue publicado en la revista Biofuels en el idioma Inglés, disponible en: <https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2223801>, lo que se presenta en esta tesis es la versión en Español.

Introducción

El biogás crudo (CH_4 , CO_2 y H_2S) se genera a partir de la digestión anaeróbica de diferentes biomásas orgánicas como desechos orgánicos de la agricultura y ganadería, subproductos y residuos, agroindustrial (residuos o subproductos de la cadena alimentaria) o desechos orgánicos de sólidos urbanos (Vega *et al.*, 2022). Sin embargo, el panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC) refiere que el CH_4 y el CO_2 se consideran los principales gases de efecto invernadero (GEI), el metano con un potencial de calentamiento global (PCG) 25 veces mayor que el CO_2 (FAO, 2011). Una de las alternativas para reducir las emisiones de GEI es la producción de biogás a partir de biodigestores controlados para producir energía. El biogás purificado se puede utilizar como combustible, el metano es un hidrocarburo que se puede quemar debido a sus propiedades químicas (Akkarawatkhoosith *et al.*, 2019; Ghatak y Mahanta, 2016; Mahmoodi-Eshkaftaki y Houshyar, 2020). Sin embargo, el CO_2 y el H_2S en el biogás generan problemas durante y después de la combustión. Por ejemplo, el CO_2 disminuye el valor calorífico y el sulfuro de hidrógeno (H_2S) es altamente corrosivo, lo que causa daños a los equipos e instrumentos (Fernández-Delgado *et al.*, 2018). Muchos autores sugieren eliminar el H_2S y el CO_2 del biogás para mejorar la calidad de combustión del biogás, una mayor eficiencia energética y evitar la corrosión de los materiales. El biogás purificado ($\text{CH}_4 >95\%$) podría ser competitivo principalmente con gasolina, diésel, leña, hidrógeno y gas natural. Esto permitiría la diversificación del biogás de calidad, mezclándolo con gases convencionales para su comercialización y mejorando el transporte (Tippayawong y Thanompongchart, 2010). El principal problema que tienen la industria o las zonas rurales es la mala calidad del biogás crudo procedente de biodigestores que no pueden comercializarse (Srichat *et al.*, 2017).

Las tecnologías de mejora del biogás se han centrado en la eliminación de CO_2 y H_2S , los métodos de mejora se han clasificado en procesos físicos, químicos y biológicos o combinados. Los estudios han demostrado la eficiencia de algunos métodos en la eliminación de CO_2 , a través de la separación por membranas, absorción química, soluciones acuosas, purificación biológica, adsorción por cambio de presión (PSA) y separación criogénica (Durán *et al.*, 2022; Iovane *et al.*, 2014; Ryckebosch *et al.*, 2011; Salafudin *et al.*, 2015). La adsorción química, la absorción por hierro y la separación

microbiológica se han utilizado para la eliminación del sulfuro de hidrógeno (Chuanchai y Ramaraj, 2018; Kuo-Ling *et al.*, 2013; Kwaśny y Balcerzak, 2016; Piechota, 2021; Srichat *et al.*, 2020). Es importante que los procesos de purificación sean eficientes, de bajo costo y de fácil manipulación, permitiendo al usuario final tener acceso a estos medios de purificación. A su vez, se requiere que la producción de metano pueda ser un proceso integral, es decir, que el uso de los residuos orgánicos pueda ser eficiente y completamente sostenible, y reducir la huella de carbono.

Este estudio tiene el propósito de llevar a cabo una revisión de las tecnologías más utilizadas para la mejora del biogás, como los procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar CO₂ (dióxido de carbono) y H₂S (sulfuro de hidrógeno), comparando la eficiencia de eliminación, las ventajas y las desventajas de los procesos.

2.2 Propiedades fisicoquímicas y aplicaciones del metano

Hoy en día, ha habido mucho interés en la producción, uso y aplicaciones del biogás en todo el mundo, que buscan resolver problemas ambientales relacionados con la eliminación de residuos, la reducción de GEI y la generación de valor agregado a los residuos. Por lo tanto, el biogás crudo, o biogás de calidad, que es el último eslabón en este proceso de recuperación de residuos, es un gas inflamable que tiene un alto poder calorífico (Moya *et al.*, 2022; Scarlat *et al.*, 2018). El biogás de calidad (100% CH₄) tiene un valor calorífico de 46 a 55 MJ kg⁻¹ o de 30.67 a 36.68 MJ m⁻³. Pero el biogás crudo con 60% de CH₄ disminuye el valor calorífico a 18.38-22 MJ m⁻³ y no es competitivo con otros combustibles. En la actualidad, existen algunos métodos para generar biometano, por digestión anaeróbica o electrolítica (un proceso novedoso). En la investigación realizada por Gonçalves *et al.* (2019) se evaluaron los procesos electroquímicos para generar biocombustible sintético (biometano) a partir de biomasa licuada. Los parámetros operacionales fueron materiales lignocelulósicos, temperatura y concentraciones variables de catalizador de zeolita acidificada. Los resultados muestran que el alto rendimiento se obtuvo a partir de biomasa evaluada a 300 °C, 4% de un catalizador zeolita acidificada, lograron un 35% de CH₄ mediante producción electrolítica de gas de síntesis/biometano.

Según Cornejo (2022) y González (2017), el metano no tiene olor ni color, está formado por un átomo central de carbono y cuatro hidrógenos (Figura 1), conocido como tetraedro o triángulo, además de ser el más corto de los hidrocarburos de cadena corta.

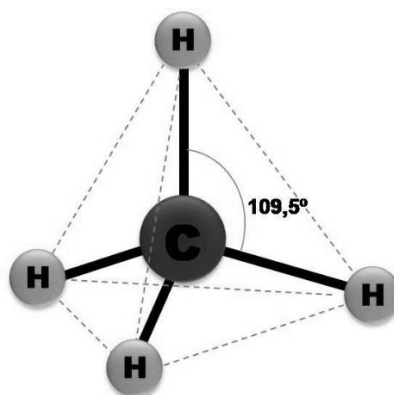
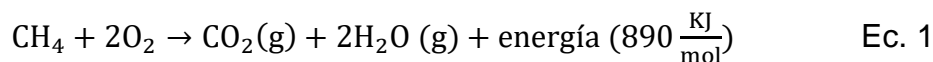


Figura 1. Estructura molecular del metano, modificada de (Moron, 2018).

El metano genera una reacción de combustión completa con oxígeno, como oxidante u oxidante natural, durante la combustión genera energía (Cuadro 1), un mol de CO₂ y dos moles de vapor de agua (Laguillo y Saúl, 2015; Vitores, 2015), como se presenta en la Ec.1:



A partir de esta reacción de combustión (Ec. 1), un mol de metano puede generar hasta 890 KJ mol⁻¹, como el gas natural (900 KJ mol⁻¹), y mayor que el hidrógeno (286 KJ mol⁻¹). Es importante mencionar que el CO₂ y el H₂O, productos de la combustión, son menos contaminantes que la liberación de metano al medio ambiente. Sin embargo, el uso de combustibles convencionales (gas LP, diésel, gasolina, entre otros) contribuye a la generación de GEI y no son renovables. El hidrógeno puede ser una alternativa a los combustibles, ya que se genera a partir de fuentes renovables y no renovables a partir de reformado o hidrólisis (Mollah *et al.*, 2015; Noor *et al.*, 2014). Sin embargo, el hidrógeno tiene ciertas desventajas, como el proceso de producción, dificultad para almacenamiento y elevado costo de obtención; que aún no se ha explorado más a fondo para su distribución y uso comercial. Además, la leña se utiliza como combustible en los países en desarrollo ya que su valor calorífico es de 16-22.5 MJ kg⁻¹ (Cuadro 1) (Mollah *et al.*, 2015). El uso irracional de la leña ha llevado a la

deforestación con graves daños ecológicos y durante la combustión genera partículas finas (PM_{2.5}) que han causado problemas irreversibles para los usuarios. Por lo tanto, la leña debe ser reemplazada por un combustible ecológico que no sea perjudicial para el medio ambiente y los seres humanos. De esta manera, el biogás procedente de la digestión anaerobia puede ser una alternativa estratégica para la valoración de residuos orgánicos, y ser una fuente de energía renovable. La evaluación integral de los residuos industriales y agroindustriales puede aportar beneficios socioeconómicos y ambientales, y al desarrollo local.

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de combustibles líquidos y gaseosos (Casanova *et al.*, 2018; Mollah *et al.*, 2015; Noor *et al.*, 2014; World Nuclear Association, 2018)

Propiedades	Unidad	Metano	Gas LP	Gas Natural	Etanol	Gasolina	Hidrogeno	Leña
Estado de agregación	-	Gas	Gas	Gas	Líquido	Líquido	Gas	Sólido
Fórmula química	-	CH ₄	C ₃ H ₈	Mezcla de gas	C ₂ H ₆	C _{7.3} H _{14,2} O _{0.15}	H ₂	-
Densidad	Kg m ⁻³	0.67	0.61	0.80	0.79	719.30	0.09	650.91
Poder calorífico	MJ kg ⁻¹	46-55	46-51	42-55	26.8	44-46	120-142	16-22.5
	MJ m ⁻³	30.67-36.68	28.06-31.11	33.6-44	21.14	31649.20-33087.80	10.68-12.64	10414.56-14645.47
Calor específico	KJ mol ⁻¹	890	-	900	1366.9	5400	286	300
Energía	KWm ⁻³	8.15-10.18	7.79-8.64	9.33-12.22	5.87	8791.44-9191.05	2.96-3.51	2892.93-4068.18

Según Tobares (2013) y World Nuclear Association (2018), las aplicaciones de biogás se centran en electricidad (8.15-10.18 kW m⁻³) y calor (30.67-36.68 MJ m⁻³), o el metano purificado podría usarse como combustible y red de gas, como se muestra en la Figura 2 (Reyes, 2017). Según Saunders (2018) un metro cúbico de biogás (~60% de metano) genera 6.35 kW de energía eléctrica. Asimismo, Valencia *et al.* (2015) demostró que un metro cúbico de biogás (>95% de CH₄) produce 10.18 kW m⁻³ de potencia nominal de corriente alterna (CA) a 110 V, generando energía durante 1.15

horas. La producción de biogás por biodigestores es una alternativa prometedora (Kasulla *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2015). Como ya se ha visto en este estudio, las impurezas (CO_2 y H_2S) del biogás disminuyen su rentabilidad y no aprovechan al máximo el valor calorífico. La purificación del biometano es uno de los desafíos actuales, ya que debe ser un proceso factible, de bajo costo, fácil de manejar con alta recuperación de metano. Asimismo, los estudios se han centrado en encontrar métodos eficientes para la purificación de biogás, a través de procesos de purificación física, química y biológica.

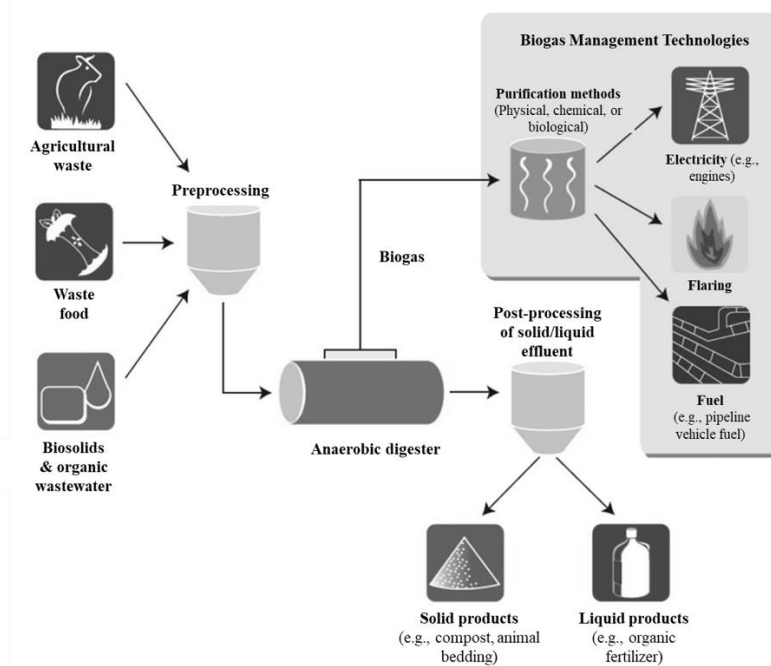


Figura 2. Usos del biogás y el metano, modificado de (Ely *et al.*, 2016).

2.3 Métodos de eliminación de CO_2 y H_2S

La Figura 3 muestra los métodos de mejora de biogás como la adsorción por cambio de presión (PSA), solventes, absorción química con el uso de bases fuertes, separación de membranas, proceso biológico y criogénico con altas presiones y bajas temperaturas. Sin embargo, este estudio se centra en métodos que requieren menos infraestructura (física, química y biológica) para eliminar el CO_2 y el H_2S del biogás, métodos de mejora eficientes, bajo costo y generación de menos subproductos (Kapoor *et al.*, 2019; Struk *et al.*, 2020; Zeballos, 2018). Debe tenerse en cuenta que durante esta revisión se ha observado que muchos autores sugieren que, en el

proceso de purificación, el H₂S primero debe eliminarse para evitar la corrosión de los materiales y luego eliminar el dióxido de carbono.

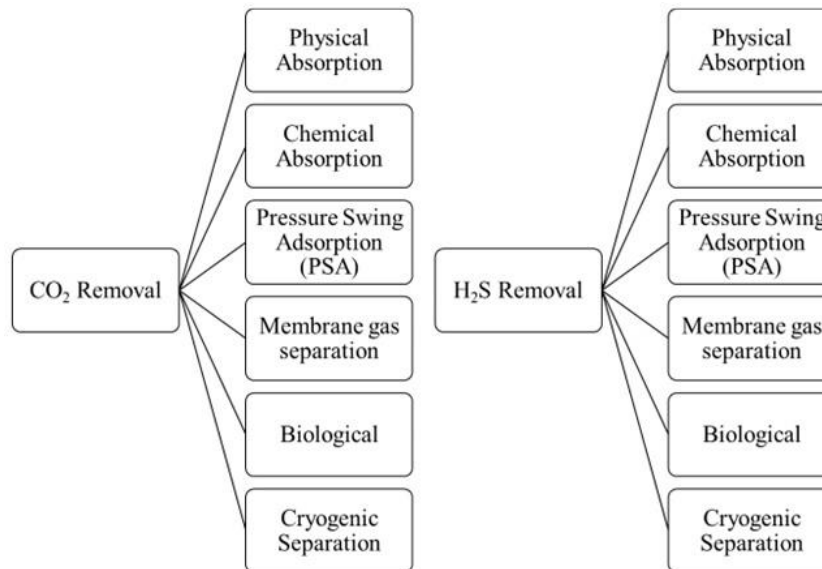
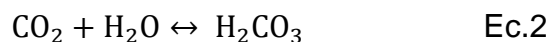


Figura 3. Métodos de purificación para la eliminación de CO₂ y H₂S por motivos físicos, químicos o biológicos.

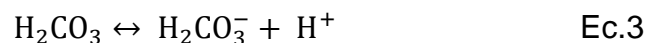
2.4 Método físico

2.4.1 Eliminación de CO₂

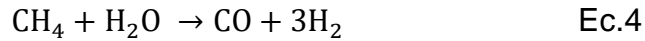
El agua es un solvente universal, esta propiedad se debe a la capacidad de formar enlaces de hidrógeno con otras sustancias, principalmente con moléculas (gases o líquidos) que tendrán afinidad por ella (polar), por esta razón, se ha estudiado para la purificación de biogás. Según Couvert *et al.* (2008) el dióxido de carbono tiene la capacidad de solubilizarse en agua con 1.65 g kg⁻¹ y metano con 0.023 g kg⁻¹, el agua puede solubilizar CO₂ y la recuperación eficiente de metano. En los procesos de purificación de metano (depurador) con agua, al comienzo del proceso el CO₂ disuelto está rodeado por moléculas de agua, donde se genera ácido carbónico (Ec.2):



Una vez que se forma el ácido carbónico, se disocia para dar bicarbonato y protones (H⁺) (Eq.3):



El CO₂ disuelto es un ácido de Lewis que genera iones H₂CO₃⁻ y H⁺, mientras que el CH₄ y el agua generan la siguiente reacción (Ec.4):



Cuando el metano se disuelve en agua genera monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), por lo que el CO podría generar problemas, como disminución del valor calorífico, baja concentración de metano y gas altamente tóxico. Según Barrera-Cardoso *et al.* (2018), en el método de purificación de agua a presión, el biogás se alimentó desde la parte inferior a una columna de lecho empacado, y el agua presurizada se roció desde la parte superior de la columna (Figura 4), la mejora del biogás fue un proceso a contracorriente. De esta manera, el CO₂ se disuelve en el agua y sale por la parte inferior de la torre, permitiendo un proceso eficiente con un 95% de CO₂ eliminado. A veces, el agua puede recircular a la propia torre de purificación. Asimismo, Morero (2014) y Morgado *et al.* (2020) señalan que el uso de agua a presión para purificar el biogás es un método físico eficiente ya que se logró la purificación de aproximadamente el 98% de metano. De la misma manera, la mayoría de los métodos utilizan el mismo principio de pulverización, solo se han estudiado el caudal de biogás, el caudal de agua, la temperatura, la concentración del reactivo, el tipo de reactivo y la presión, entre otros factores (Karne *et al.*, 2022; Leitón, 2014; Ofori-Boateng y Kwofie, 2009; Vijay *et al.*, 2006).

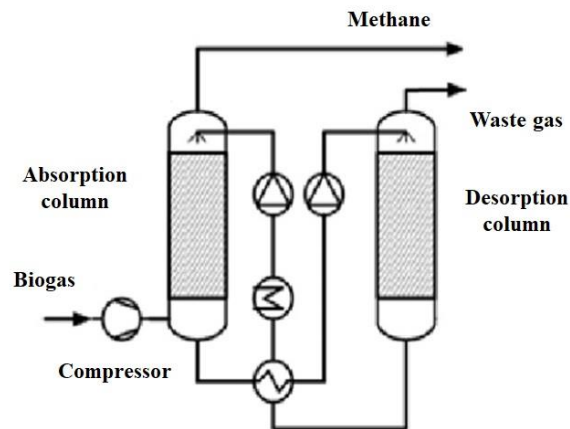


Figura 4. Esquema general de la absorción física de CO₂ con el uso de agua, modificado de (Barrera-Cardoso *et al.*, 2018).

El estudio realizado por Vijay (2007) mostró que la purificación del biogás depende principalmente de la presión en la columna de lavado, el caudal del agua y el caudal de biogás en la entrada de la torre. La composición inicial del biogás fue 60-65% CH₄, 35-40% CO₂ y 0.5-1.0% de H₂S. El sistema de purificación de biogás fue diseñado para evaluar diferentes condiciones, variando el caudal de entrada de biogás de 1 a 3 m³ h⁻¹, 0.6 a 1 MPa de presión y 2.5 m³ h⁻¹ de agua a presión a temperatura ambiente. Los resultados muestran diferentes valores de CO₂ eliminado de 87.6, 99, 83.9, 73.8 y 53.7% con caudales de biogás h⁻¹ de 1, 1.5, 2, 2.5 y 3 m³, respectivamente, y presión de biogás de entrada de 1 MPa. Por lo tanto, en el flujo de biogás de entrada 1.5 y 2.5 m³ h⁻¹ de agua a presión y 1MPa de presión elimina el 99% de CO₂ del biogás. El lavado de agua es un proceso sencillo, económico y adecuado para purificar el biogás. Peña y Dávila-del-Carpio (2020) construyeron y evaluaron un sistema de purificación de biogás con agua a presión (Depurador) para eliminar el CO₂. La composición inicial de biogás fue de 45.8% CH₄ y 21% de CO₂. En este estudio, se evaluaron presiones de 600, 900 y 1000 kPa (Kilopascuales) a temperaturas de 10, 15 y 20 °C. Los resultados muestran que a 10°C y 10 bar y se eliminó el 79.5% de CO₂. Esto logró reducir las impurezas de biogás a proporciones aceptables (Cuadro 2). Leitón (2014) en su estudio utilizó agua a presión en una torre de purificación a 200 kPa, un caudal de agua de 25 L min⁻¹ a 26°C y un caudal de biogás de 20 L min⁻¹ (Cuadro 2). En este proceso, el biogás encontró la contracorriente de agua, y finalmente, se utilizó una columna de secado para la eliminación de humedad con 2 kg de óxido de calcio (CaO) y 1 kg de carbón vegetal (CV). La concentración inicial de metano fue del 69% (CO₂ y H₂S no reportados) y el proceso de purificación final logró un 93% de metano recuperado. Este estudio demostró que el biogás puede ser purificado y comprimido utilizando materiales y equipos disponibles en la región a un bajo costo. Ofori-Boateng y Kwofie (2009) evaluaron la purificación y compresión de biogás de un biodigestor de 50 m³ y evaluaron un lecho lleno de agua de fregado. El biogás estaba compuesto de 55-65% de metano y 30-45% de dióxido de carbono. Los resultados mostraron que se eliminó el 92% de CO₂ y se recuperó hasta un 95% de metano (Cuadro 2). La investigación concluyó que el biogás debe purificarse para su almacenamiento y prolongar la eficiencia de la producción de energía. Islamiyah *et al.* (2015) se propusieron diseñar un sistema de purificación del depurador de agua para eliminar el

CO₂ del biogás. En el estudio variaron los niveles de agua en la torre: 50, 60 y 70 cm de altura; 50 L min⁻¹ de caudal de agua. La composición inicial del biogás fue de 66.6% CH₄, 15% CO₂ y 18.4 mg L⁻¹ H₂S, los resultados muestran una eficiencia de eliminación del 21.2% CO₂. El autor concluyó que la purificación del biogás con un depurador de agua no era tan eficiente. Gantina *et al.* (2020) estudiaron el método del depurador de agua para eliminar el CO₂ y eliminarlo del biogás. Los factores de entrada fueron dos, tres y cuatro bar de presión de biogás y 0.1 y 0.15 L s⁻¹ de flujo de agua en 60 segundos. La composición inicial de biogás fue 51.1% CH₄, 20.1% CO₂ y 20.8% N₂. Este estudio informó que el CO₂ se eliminó efectivamente con un 99.5% y el CH₄ aumentó en un 38.18% en biogás, utilizando 4 bar de presión y un caudal de agua de 0.15 L s⁻¹. Nie *et al.* (2013) compararon el lavado de agua y el carbonato de propileno para eliminar el CO₂ del biogás. La condición de operación utilizando lavado de agua fue de 1300 a 1800 mL min⁻¹ de caudal de biogás, 200 mL min⁻¹ de agua y 800 kPa de presión de adsorción. La condición de operación utilizando carbonato de propileno fue de 5000 a 6500 mL min⁻¹ de caudal de biogás, 100 mL min⁻¹ de agua y 800 kPa de presión de adsorción a temperatura ambiente. La composición inicial de biogás fue de 54.63 a 57.29% de CH₄, 42.71 a 45.37% de CO₂ y 0 a 400 ppm de H₂S. El carbonato de propileno fue el mejor en la eliminación de CO₂ con 22 L⁻¹, mientras que el agua de lavado eliminó 4.98 L⁻¹. Este estudio demostró que el carbonato de propileno en la eliminación de CO₂ se aplicó de manera eficiente para la mejora del biogás.

Cuadro 2. Comparación del método de absorción física para la eliminación de CO₂.

Reactivos	Entrada de biogás	Entrada de reactivo	T (°C)	CO ₂ Inicial (%)	CO ₂ Final (%)	CH ₄ Inicial (%)	CH ₄ final (%)	Referencias
H ₂ O	1.5 m ³ h ⁻¹	1.8 m ³ h ⁻¹	TA*	40	1	60	85	(Vijay, 2007)
H ₂ O	10 bar	15 L s ⁻¹	10	21	6.9	45	85	(Peña y Dávila-del-Carpio, 2020)
H ₂ O	25 L min ⁻¹	20 L min ⁻¹	26	-	-	69	93	(Leitón, 2014)
H ₂ O	-	-	TA*	-	8	55-65	75-95	(Ofori-Boateng y Kwofie, 2009)
H ₂ O	-	50 L min ⁻¹	TA*	15	11.62	66.6	-	(Islamiyah <i>et al.</i> , 2015)
H ₂ O	60 L s ⁻¹ ₁	0.15 L s ⁻¹ ₁	TA*	20.1	0.11	51.1	70.6	(Gantina <i>et al.</i> , 2020)
H ₂ O	1.3-1.8 L min ⁻¹	0.2 L min ⁻¹	TA*	42.71	4.98 L	54.63	90	(Nie <i>et al.</i> , 2013)

*TA-Temperature ambiente

En el método físico, se han utilizado agua a presión y disolventes en diferentes condiciones que, aunque el método PSA ha permitido la eliminación eficiente de CO₂, podrían presentar muchos inconvenientes en su implementación a escala real, aunque la capacidad de absorción de agua es relativamente alta para el CO₂, podría requerir grandes cantidades de agua para purificar varios metros cúbicos de biogás. Los estudios han demostrado que el agua a presión en el método de purificación de biogás es efectiva a bajas tasas de flujo, es fácil de operar, requiere poca infraestructura y es económicamente viable. El principal problema en la mejora del biogás con lavado de agua es la producción de monóxido de carbono (CO), un gas altamente tóxico, que afecta la salud humana. Además, el agua, en la mejora del biogás, cambia completamente sus propiedades físicas y químicas, lo que llevaría a la búsqueda de un proceso adicional para su tratamiento. Estos inconvenientes podrían aumentar los costos de purificación del biogás, el pH de los cambios de agua, las aguas residuales, la contaminación, los cambios costosos y no rentables.

2.4.2 Eliminación de H₂S

Hoy en día, se han desarrollado diversas tecnologías para eliminar H₂S por adsorción física, el agua a presión ha sido alternativa en la mejora del biogás. Según Campuzano (2017), el sulfuro de hidrógeno es soluble en agua a razón de 0.41 g por 100 ml a 20 °C, para disociarse en iones hidronio y azufre como se muestra en las reacciones (Ec.5-7):



A su vez, Burgos (2003) y Camizán (2015) mencionan que la solubilidad del H₂S está influenciada por la temperatura, es decir, la temperatura más alta y la mejor efectividad. Mójica *et al.* (2017) investigaron un proceso de purificación con agua a presión para la eliminación de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, en diferentes condiciones como el caudal de biogás de 20 L min⁻¹, 54.5 y 72 kPa de presión de adsorción con 27 y 37 °C de temperatura del agua. El biogás inicial presentó una concentración de 68.57% CH₄, 30.56% CO₂ y 0.88% de H₂S. Cuadro 3, al final del proceso se obtuvieron

93.15% CH₄, 6.84% CO₂ y 0.01% de H₂S, ambas condiciones de operación fueron eficientes, eliminando 77% CO₂ y 98% H₂S. Los autores sugieren explorar métodos de secado de biogás para mejorar su calidad. Cheng-Chang *et al.* (2014) estudiaron el lavado de agua para la purificación de biogás de una granja de cerdos. Los ensayos de agua presurizada se realizaron con una entrada del caudal de biogás de 50, 100 y 140 L min⁻¹, un tiempo de retención de 30 y 90 segundos de biogás, y diferentes niveles de agua de 50, 60 y 70 cm, el H₂S inicial en biogás fue de alrededor de 6000 ppm. Los resultados muestran que el H₂S se eliminó significativamente con un 51% en 30 segundos y un nivel de agua de 70 cm, disminuyendo el caudal de biogás a 50 cm. El proceso para eliminar H₂S fue eficiente en un corto tiempo de operación, pero la capacidad de absorción de agua disminuyó rápidamente y el reemplazo de agua fue constante en el proceso.

Läntelä *et al.* (2012) estudiaron el efecto del reciclaje de agua para la purificación de biogás de un vertedero. los ensayos se realizaron sobre el efecto de la presión de 20-25 bar, la temperatura de 10-25 ° C y el caudal de agua de 5.5 a 11 L min⁻¹. El biogás inicial fue 50.8-57.9% CH₄, 37.8- 43.6% CO₂ y 100-166 ppm H₂S. Los resultados mostraron que el agua a presión, con pH 4.6, tenía una alta capacidad de absorción a un caudal de biogás de 11 L min⁻¹ y una presión de 20 bar a 15 °C. Asimismo, se demostró que los mejores resultados se generaron a 25 bar, 11 L min⁻¹ y 10 a 15 °C con 90.2% de metano recuperado, 88.9% de CO₂ y 90% de H₂S eliminado. Mejorar la relación entre el ancho y la altura de la columna podría ser eficiente en la eliminación de CO₂ y H₂S, en comparación con las plantas comerciales de purificación de biogás.

Islamiyah *et al.* (2015), se propusieron diseñar un sistema de purificación de biogás con depurador de agua para eliminar el CO₂ y el H₂S del biogás. En el estudio variaron los niveles de agua en la torre: 50, 60 y 70 cm de altura; caudal de agua de 50 L min⁻¹. La composición inicial del biogás fue de 66.6% CH₄, 15% CO₂ y 18.4 mg L⁻¹ de H₂S, los resultados muestran una eficiencia de eliminación de 32.8% de H₂S. El autor concluyó que la purificación de biogás con un depurador de agua no era tan eficiente.

Cuadro 3. Comparación del método por absorción física para la eliminación de H₂S.

Reactivos	Entrada de biogás	Entrada de reactivo	T (°C)	H ₂ S Inicial	H ₂ S Final	CH ₄ inicial (%)	CH ₄ final (%)	Referencias
H ₂ O/aserrín/ carbón activado	0.65 m ³ h ⁻¹	20 L min ⁻¹	27	8800 ppm (0.88%)	100 ppm (0.01%)	68.57	93.1 5	(Mójica <i>et al.</i> , 2017)
H ₂ O	140 L min ⁻¹	-	TA*	6000 ppm (6%)	2933.3 ppm (0.29%)	-	-	(Cheng- Chang <i>et al.</i> , 2014)
H ₂ O	7.41 Nm ³ h ⁻¹	5.5 a 11 L min ⁻¹	20- 25	100-166 ppm (0.01- 0.016%)	13.2 ppm (0.0013%)	50.8- 57.9	90.2	(Läntelä <i>et al.</i> , 2012)
H ₂ O	-	50 L min ⁻¹	-	18.4 mg L ⁻¹	-	66.6	-	(Islamiyah <i>et al.</i> , 2015)

*TA-Temperatura ambiente

El depurador de agua como el método físico puede considerarse eficiente para eliminar CO₂ y H₂S, sin embargo, requiere grandes volúmenes de agua para el proceso de purificación, la temperatura, el agua presurizada, la recirculación del agua y el tratamiento de aguas residuales son necesarios. Asimismo, se requiere energía eléctrica para la aspersion del agua y para su tratamiento. La mayoría de los estudios para el tratamiento físico se han centrado en el uso de sistemas de purificación de agua a escala de laboratorio, aunque, en un proceso a gran escala, se necesitaría una infraestructura especializada debido a la gran cantidad de agua utilizada y una planta de tratamiento para las aguas residuales generadas.

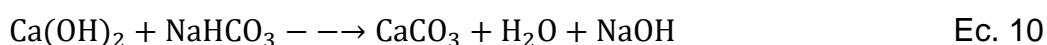
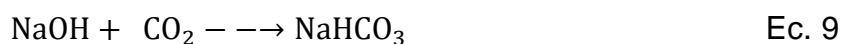
2.5 Método químico

2.5.1 Eliminación de CO₂

El método químico ha sido uno de los métodos estudiados para eliminar CO₂ y H₂S del biogás, principalmente con bases fuertes como hidróxido de calcio hidróxido de sodio (NaOH), (Ca(OH)₂), e hidróxido de potasio (KOH), en solución acuosa o gránulos (Ghatak y Mahanta, 2016; Maile, *et al.*, 2017). En este caso, Kismurtono *et al.* (2015) estudiaron la transferencia de masa en la eliminación de CO₂ del biogás utilizando solución de NaOH. Se evaluó una solución de NaOH de 1 M de columna empaquetada, el flujo de biogás de 600 mL s⁻¹, el caudal de solución de 50 mL s⁻¹ y 350 a 700 mm H₂O. El biogás crudo estaba compuesto por 63.2% de CH₄, 25.29% de CO₂, 11.10% de CO₂ e impurezas. Utilizando un caudal de biogás de 600 mL s⁻¹, un caudal de solución de NaOH (1 M) de 50 mL s⁻¹, a 350 mm H₂O a 30 °C se eliminó el 80% de CO₂

y se recuperó el 88.94% de CH₄. Maile *et al.* (2017b) evaluaron la absorción química de CO₂ en la purificación de biogás. El estudio evaluó tres concentraciones de NaOH con 1 (M1), 2 (M2) y 3 (M3) mol L⁻¹. El biogás crudo estaba compuesto de 56% de metano, 42% de dióxido de carbono y trazas. Este estudio reveló que el más eficiente se observó con 3 mol L⁻¹ de NaOH con 66% de CO₂ eliminado y un aumento de la concentración de metano con 80%. Ghatak y Mahanta (2016) evaluaron un sistema de purificación de biogás utilizando cal sodada (compuesto de Ca(OH)₂ (94%), NaOH (2-4%), KOH (1-3%) y H₂O (14-19%)) para eliminar el CO₂ del biogás. El estudio evaluó el caudal comprimido de biogás de entrada de 1 a 5 L min⁻¹ y de 1 a 5 bares de presión, luego el biogás pasó a través de la torre de purificación y el biogás se compuso de 55 a 77% de CH₄, 30 a 45% de CO₂ y trazas. Los resultados muestran que un caudal de biogás de 1 L min⁻¹ y una presión de 5 bar eliminan más del 95% (1.344%) de CO₂ y recuperan el 97.7% de CH₄ del biogás. Según el autor, aunque existen muchos métodos de depuración de biogás, no todos se pueden implementar en zonas rurales.

En el proceso de purificación de biogás, la cal sodada genera tres reacciones consecutivas (Ec. 8-10,) con CO₂, y como subproductos carbonato de calcio (CaCO₃), bicarbonato de sodio (NaHCO₃) y NaOH (Ghatak y Mahanta, 2016):



Como subproducto de la reacción de purificación, se genera CaCO₃, que puede ser propuesto como restaurador de suelos agrícolas.

Srichat *et al.* (2017) evaluaron la eliminación de CO₂ del biogás con hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) y solución de amina. El estudio evaluó diferentes condiciones, 0.1 y 0.2 moles de Ca(OH)₂ y 0.1 y 0.2 moles de amina monoetanol (MEA); el caudal de biogás fue de 5, 10 y 15 L min⁻¹ y el caudal de solución fue de 10, 20 y 30 L min⁻¹ y un tiempo de retención de 30 minutos (Cuadro 4). La composición del biogás crudo fue de 51% CH₄ y 39.36% CO₂. Los resultados muestran que los mejores resultados fueron con 0.2 moles de Ca(OH)₂, un caudal de solución de 10 L min⁻¹ y un flujo de biogás de 5 L min⁻¹. Este estudio muestra que los factores involucrados en la purificación de biogás

son la concentración, el tipo de reactivo, el caudal de solución y el caudal de biogás. Además, Maile *et al.* (2017) evaluaron el potencial de la amina monoetanol (MEA) en la purificación de biogás. El estudio varió las concentraciones de MEA de 10 a 30% y se utilizaron tres temperaturas (temperatura ambiente, 30 y 40 °C) para la adsorción de CO₂ del biogás. El biogás crudo estaba compuesto por 52% de CH₄ y 46% de CO₂ y trazas. Los resultados muestran que la solución de MEA al 30% y 40 °C eliminaron el 76% de CO₂ y se recuperó el 88% de CH₄. MEA elimina las impurezas del biogás de manera eficiente. Sin embargo, las aminas en la mejora del biogás tienden a ser costosas a escala de laboratorio, la disposición final de aminas podría generar un costo adicional en el proceso y aumentar los costos de purificación.

Cuadro 4. Comparación del método de absorción química para la eliminación de CO₂.

Reactivo	Entrada de biogás	Entrada de reactivo	T (°C)	CO ₂ Inicial (%)	CO ₂ Final (%)	CH ₄ Inicial (%)	CH ₄ final (%)	Referencias
Cal sodada	1 L min ⁻¹	5 bar	TA*	-	1.34	41.5	97.7	(Ghatak y Mahanta, 2016)
Ca(OH) ₂	5 L min ⁻¹	10 L min ⁻¹	TA*	39.6	-	51	89.30	(Srichat <i>et al.</i> , 2017)
NaOH	-	-	TA*	46	16	52	80	(Maile <i>et al.</i> , 2017a)
MEA	-	-	TA*	46	15	52	85	(Maile <i>et al.</i> , 2017)

*TA-Temperatura ambiente.

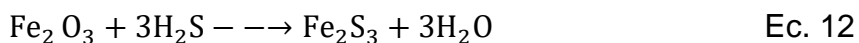
Aunque hay una amplia variedad de reactivos químicos utilizados para la mejora del biogás, el MEA es eficiente en el proceso de purificación de biogás. Sin embargo, los reactivos tienen la desventaja de ser caros y de difícil acceso para el tratamiento a gran escala. De lo contrario, las bases químicas tienden a ser fáciles de encontrar, económicas y respetuosas con el medio ambiente, por ejemplo, las sales generadas después de la purificación se pueden utilizar para restaurar el suelo. Es importante tener en cuenta que, las bases fuertes diluidas son útiles para eliminar el CO₂ del biogás, pero al final de su reactividad debe descartarse o neutralizarse, generando costos adicionales para la purificación del biogás. Por otro lado, las bases fuertes concentradas en la base sólida podrían ser prometedoras, ya que el hidróxido de calcio con dióxido de carbono genera CaCO₃ como producto final, en lugar de ser desechado puede usarse como restaurador de suelos.

2.5.2 Eliminación de H₂S

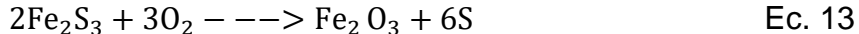
En la mejora del biogás, el óxido de hierro (III) (Fe₂O₃) es el más utilizado, que es relativamente fácil de preparar, a bajo costo y eficiente para eliminar H₂S. En la preparación de óxido de hierro (Fe₂O₃), se genera por una reacción de oxidación utilizando hierro (Fe) y oxígeno (O₂) como reactivos, como se ilustra en la ecuación 11:



Una vez obtenido el Fe₂O₃ se evalúa en diferentes condiciones para eliminar el H₂S, generalmente, esta eliminación se lleva a cabo siguiendo la reacción (Ec. 12), formando una molécula de sulfuro de hierro o férrico tipo III y tres moles de agua (Ray *et al.*, 2015, 2016).



Del mismo modo, el sulfuro de hierro tipo III es muy fácil de convertir al estado de Fe₂O₃ activo (Ec. 13), en presencia de oxígeno, que de nuevo el Fe₂O₃ se puede utilizar como sustrato para eliminar el H₂S.



Elizondo y Herrera (2012) evaluaron los procesos de purificación para la eliminación de H₂S para mejorar la calidad del biogás. Los filtros estaban compuestos por, I) cáscara de coco/grava 2:1; II) aserrín/arena 5:1, carbón vegetal o bokashi (con altas concentraciones de hierro de 5.593 ppm). La composición inicial del biogás fue 60-70% CH₄, 30-40% CO₂ e impurezas. Se observó que el sistema de carbón eliminó 97.08% de H₂S, mientras que el filtro de bokashi eliminó 96.01%, con resultados muy similares (Cuadro 5). Por lo tanto, ambos sistemas se consideran eficientes para eliminar H₂S, sistemas respetuosos con el medio ambiente y económicos. Es interesante utilizar los residuos orgánicos como alternativa para el tratamiento del biogás. En cambio, Torres-Calderón *et al.* (2020) evaluaron dos torres de lecho fijo para la eliminación de sulfuro de hidrógeno. Torre (1) con viruta de hierro pretratada con HCl y NaOH, Torre (2) con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y cloruro de sodio (NaCl), y el control utilizado únicamente hierro. El biogás crudo estaba compuesto por 180 ppm de H₂S, que se introdujo con un caudal de 111.6 L h⁻¹ a las torres de lecho fijo a 19 °C. Los resultados muestran que el H₂S más alto eliminado ocurrió en la Torre 2

con 99%. 58% de H₂S eliminado y 96.36% eliminado en la Torre 1. (Cuadro 5). Por lo tanto, ambas torres de purificación son eficientes para eliminar H₂S. Mendoza (2015) evaluó la eliminación de H₂S del biogás, esta investigación evaluó cuatro sustratos; limadura de hierro, carbón activado, compost e inyección de aire, en diferentes concentraciones en eliminación de H₂S, costo y facilidad de operación de los filtros. En los resultados se observó que el mejor sustrato fue en la limadura de hierro en la eliminación de H₂S, con una eficiencia de 94.08% de H₂S eliminado (Cuadro 5). Por lo tanto, las limaduras de hierro podrían ser una alternativa eficiente en la eliminación de H₂S, fácil de obtener y un proceso seguro y de bajo costo.

Manrique *et al.* (2020) evaluaron la cáscara de arroz (*Oryza sativa*) como material adsorbente para la eliminación de H₂S del biogás. La cáscara de arroz se evaluó como carbón activado de arroz (ACrice), carbón activado de arroz impregnado de óxido de hierro (ACFeO) y carbón activado comercial (CAC). La composición inicial de biogás fue 60% CH₄, 30% CO₂, 1-2% de H₂S y trazas. La eliminación de H₂S fue del 39% de ACrice, el 48.5% de ACFeO y el 31.25% de CAC. El carbón activado impregnado con FeO (óxido férrico) fue el mejor material para purificar el biogás. Sin embargo, la obtención del material absorbente a base de cáscaras de arroz requiere un proceso complejo, lo que aumenta el costo y dificulta el acceso. La investigación de Valencia *et al.* (2015) estudiaron el diseño, construcción y evaluación de un sistema de purificación y compresión para biogás. Esta investigación tuvo como objetivo eliminar el CO₂ y H₂S del biogás, el primer filtro de purificación tenía Fe₂O₃, pretratado con HCL y NaOH, y un filtro secundario con agua a presión recirculada. La composición del biogás crudo fue 50-60% CH₄, 30-40% CO₂ y 0.5 a 3% H₂S. Los resultados muestran que el sistema de purificación reduce los valores de CO₂ en el biogás del 30% de su valor inicial al 9%, 70% de CO₂ eliminado, y del 1.5% de H₂S al 0.0008%, 99% de H₂S eliminado, prácticamente insignificante (Cuadro 5).

Quesada *et al.* (2007) estudiaron el uso de óxido de calcio y Fe₂O₃ para eliminar el H₂S del biogás de una granja lechera. Los resultados indicaron que el sulfuro de hidrógeno inicial se encontró en concentraciones de 370 ppm dentro del biogás producido. Después de la purificación del biogás a través del filtro de óxido de calcio, una concentración de H₂S fue de 225 ppm, logrando una reducción del 40%. Estos

valores estuvieron por debajo de los resultados presentados en otros estudios de purificación.

Cuadro 5. Comparación del método de adsorción química para la eliminación de H₂S.

Reactivos	Entrada de biogás	H ₂ S Inicial (ppm)	H ₂ S Final (ppm)	H ₂ S eliminado (%)	Referencias
Carbón	7.94 m ³ (28 L min ⁻¹)	68.09	1.98	97.08	(Elizondo y Herrera, 2012)
Bokashi	1.70 m ³ (6 L min ⁻¹)	92.61	3.71	96.01	(Elizondo y Herrera, 2012)
Limadura de hierro	-	-	250	94.08	(Mendoza, 2015)
Hierro pretratado	111.6 L h ⁻¹	180	9.37	94.79	(Torres-Calderón <i>et al.</i> , 2020)
Hierro pretratado	111.6 L h ⁻¹	180	0.75	99.58	(Torres-Calderón <i>et al.</i> , 2020)
Carbón activado	-	1000	610	39	(Manrique <i>et al.</i> , 2020)
FeO/ carbón activado	-	1000	515	48.5	(Manrique <i>et al.</i> , 2020)
Carbón activado comercial	-	1000	687.5	31.25	(Manrique <i>et al.</i> , 2020)
Fe ₂ O ₃ /H ₂ O	-	1500	8	99.46	(Valencia <i>et al.</i> , 2015)
CaO	7 kPa	370	225	40	(Quesada <i>et al.</i> , 2007)

La eliminación de H₂S con CaO, sustancias ferrosas llamadas hematíes, carbón activado, limaduras de hierro (Fe) y materia orgánica puede ser una alternativa viable en la mejora del biogás, disponible en cualquier región y económica. El uso de materiales orgánicos en forma de carbón activado ha sido un material novedoso para el biogás, es importante mejorarlo para estudiar diferentes condiciones para optimizar su uso y hacer que el proceso sea eficiente. Sin embargo, el Fe₂O₃ es prometedor en la eliminación del H₂S, ya que es un material barato, fácil de generar, seguro de usar, con gran efectividad, y puede ser reutilizado.

2.6 Método biológico

2.6.1 Eliminación de CO₂

Los métodos biológicos son ecológicos e interesantes en la mejora del biogás, los estudios han involucrado principalmente microorganismos quimiotróficos o fotosintéticos. Los procesos de purificación por procesos biológicos no generan residuos, son económicos, no requieren productos químicos, requieren bajo consumo de energía, altas tasas de degradación, se pueden utilizar sistemas soportados por biofilms y especies nativas de cada región. Sin embargo, los procesos biológicos son lentos y los microorganismos aislados tienden a contaminarse fácilmente (Angelidaki *et al.*, 2018). Por esta razón, muchos estudios han propuesto el CO₂ del biogás para estudiar el crecimiento, la recolección de microalgas y la mejora del biogás. En los fotobiorreactores, las microalgas asimilan el dióxido de carbono (C_{inorgánico}) por el mecanismo de concentración de CO₂ (CCM), principalmente para reducir el CO₂ y aumentar el O₂ en el medio ambiente (Spalding, 2008). En el proceso para eliminar el CO₂ con microalgas y cianobacterias, su principal fuente de crecimiento es la luz solar, los nutrientes, el CO₂ del biogás y el agua, como se ilustra en la Figura 5, los productos finales son biomasa de microalgas, biogás purificado (>90% de metano) y gas O₂ (Converti *et al.*, 2009; Guo *et al.*, 2018; Panduro-Pisco *et al.*, 2020).

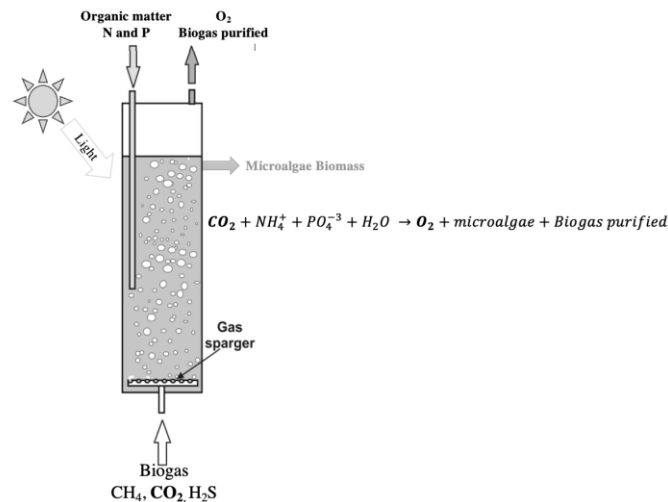


Figura 5. Ilustración de las implicaciones para el crecimiento de microalgas, modificada de Płaczek *et al.* (2017).

Chuanchai y Ramaraj (2018) evaluaron la producción de biogás con pasto búfalo, estiércol y purificación de biogás. El proceso experimental se llevó a cabo mediante microalgas fotoautótrofas (*Chlorella vulgaris*), durante 8 h de tiempo de retención, se estudió la entrada de dos flujos de biogás de 0.9 y 1.9 L min⁻¹. El biogás crudo estaba compuesto por 71% CH₄, 28% CO₂ y 0.013% de H₂S. Los resultados muestran que el caudal de biogás de 0.9 L min⁻¹ alcanzó una concentración de 91% de CH₄ recuperado (Cuadro 6) y 80% de CO₂ eliminado; mientras que el caudal de biogás de 1.9 L min⁻¹ recuperó un 83% de CH₄ y un 46.4% de CO₂ eliminado. Es importante tener un equilibrio en la relación N:P que permita maximizar la eliminación total de CO₂ del biogás.

Converti *et al.* (2009) investigaron la purificación de biogás mediante un proceso biológico utilizando la cianobacteria *Arthrospira platensis*. La composición inicial del biogás fue de 70.5-76.0% de CH₄ y 13.2-19.5% de CO₂. El CO₂ del biogás se utilizó como fuente de CO₂ en un fotorreactor biológico con *Arthrospira platensis* con un tiempo de retención de 50 días. Los resultados muestran que existe una relación directa entre el crecimiento de la biomasa y el consumo de CO₂ (95%) (Cuadro 6). El funcionamiento de una planta de producción y depuración de biogás puede generar problemas como la monitorización de la eliminación de CO₂, la incidencia de la luz y la monitorización de parámetros fisicoquímicos.

Panduro-Pisco *et al.* (2020) evaluaron la purificación biológica de biogás a partir de lodos utilizando la microalga *Chlorella vulgaris*. En este estudio, la eficiencia de la eliminación de CO₂ del biogás se evaluó mediante diferentes concentraciones de microalgas (10, 30 y 60%) y biol como sustrato (50, 100 y 150 mL). La composición inicial de biogás fue 67.75% CH₄, 32.43% CO₂ y 0.64% (6394.33 ppm) H₂S. Los resultados muestran que el tratamiento con 30% de microalgas, 60 L de agua y 100 mL de Biol, eliminó 25.5% de CO₂, 74.5% de CH₄ recuperado y un valor calorífico de 7049 kcal. La eficiencia de eliminación de CO₂ podría mejorarse recirculando el mismo biogás al biorreactor o acoplado un método físico o químico para mejorar los rendimientos.

Guo *et al.* (2018) estudiaron el óptimo fotoperíodo e intensidad de luz, y proceso de cocultivación de microalgas para eliminar el CO₂ del biogás. Se evaluó la eficiencia de

eliminación de CO₂ con Cultivo 1: *Chlorella vulgaris* (FACHB-31); Cultivo 2: *Chlorella vulgaris*/ *Ganoderma lucidum* (*G. lucidum*, 5.765) y Cultivo 3: *Chlorella vulgaris*/ lodo activado. Estos fueron sometidos a tres fotoperiodos (luz: oscuridad), 12h:12h, 14h:10h, y 16h:8h en 10 días, luz blanca fría con una luz de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 25°C y biogás crudo de 64.59% CH₄ y 33.7% CO₂. Los resultados muestran que *C. vulgaris* / *G. lucidum* eliminaron 59.37% CO₂ bajo un fotoperíodo de 14 h luz: 10 h de oscuridad y 450 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ luz. Los cultivos *Chlorella vulgaris*/ *Ganoderma lucidum* y *Chlorella vulgaris*/ sistemas de lodos activados no tuvieron diferencias significativas en la eliminación de CO₂. Además, Xu *et al.* (2020) estudiaron bacterias endófitas (bacterias endógenas S395-1 y S395-2) aisladas de *Chlorella vulgaris* y cocultivadas para determinar una purificación adecuada del biogás. Se evaluaron los cocultivos de *Chlorella vulgaris* y *Chlorella vulgaris*/ bacterias (*Chlorella v./* S395-1 y *Chlorella v./*S395-2) durante 10 días, 12 h luz / 12 h oscuridad, 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ intensidad de luz a 25°C. El biogás inicial estaba compuesto de 62.17% de CH₄, 34% CO₂ e impurezas. Los resultados muestran que el sistema simbiótico tuvo eficiencias de eliminación de 68.13% CO₂. Las microalgas bacterianas podrían mejorar el tratamiento de aguas residuales y eliminar el CO₂ del biogás con éxito.

Miyawaki *et al.* (2021) estudiaron la producción y purificación de biogás a partir de la microalga *Tetradismus obliquus*. En la investigación, el estiércol de cerdo, el estiércol de ganado y las aguas residuales domésticas se utilizaron para producir biogás. Se utilizó un fotobiorreactor de transporte aéreo inoculado con microalgas *Tetradismus obliquus*, con un caudal de biogás de 1 L min⁻¹, se recogieron muestras a los 5, 30 y 60 minutos antes y después de la purificación a temperatura ambiente (35°C). La composición inicial del biogás fue de ~63% CH₄, ~37% CO₂ y <100 ppm H₂S. La microalga *Tetradismus obliquus* absorbe eficientemente CO₂ con 86% eliminado. Por lo tanto, la inyección de biogás demostró ser efectiva para la producción de biomasa de microalgas a gran escala y la mejora del biogás.

Cuadro 6. Comparación del método biológico para la eliminación de CO₂.

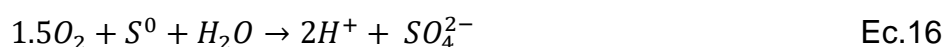
Especies	Entrada de biogás (L min ⁻¹)	CO ₂ Inicial (%)	CO ₂ Final (%)	CH ₄ Inicial (%)	CH ₄ Final (%)	Referencias
<i>Chlorella vulgaris</i>	0.9	28	8.56	71	91	(Chuanhai y Ramaraj, 2018)
<i>Chlorella vulgaris</i>	1.8	28	15	71	85	(Chuanhai y Ramaraj, 2018)
<i>Arthrospira platensis</i>	-	19.5	-	76	-	(Converti <i>et al.</i> , 2009)
<i>Chlorella vulgaris</i> (10%w L ⁻¹)	-	39.6	32.2	60.4	67.6	(Panduro-Pisco <i>et al.</i> , 2020)
<i>Chlorella vulgaris</i> (30%w L ⁻¹)	-	39.6	25.5	60.4	74.5	(Panduro-Pisco <i>et al.</i> , 2020)
<i>Chlorella vulgaris</i> (60%w L ⁻¹)	-	39.6	39	60.4	60.5	(Panduro-Pisco <i>et al.</i> , 2020)
<i>Chlorella vulgaris</i> / <i>G. lucidum</i>	-	33.7	23.5	64.59	-	(Guo <i>et al.</i> , 2018)

En algunos casos, los procesos de purificación de biogás tanto físicos como químicos generan un impacto ambiental irreversible, que podría ser menos dañino después del tratamiento una vez finalizada su vida útil. Asimismo, los procesos químicos han sido los más eficientes para la mejora del biogás, pero deben prestar atención a algunas consideraciones, que podrían ser las más baratas y menos contaminantes. El proceso biológico ha sido y ha generado resultados prometedores en la mejora del biogás, ya que tiene ciertas ventajas sobre otros tratamientos ya que se obtienen varios productos (biomasa de microalgas y biogás purificado de calidad) y es respetuoso con el medio ambiente. Además, las microalgas pueden utilizarse como materia prima para la generación de bioproductos (Bajracharya *et al.*, 2009), así como para la producción y purificación de biogás, lo que podría considerarse como un proceso integral o bajo concepto de biorrefinería.

2.6.2 Eliminación de H₂S

Como ya se ha visto en este estudio, existen procesos físicos y químicos para la eliminación de H₂S y procesos biológicos, que han sido evaluados a escala de laboratorio y piloto. Estos métodos utilizan algunos microorganismos que podrían metabolizar sus sustancias líquidas o gaseosas. En concreto, microorganismos que pueden eliminar el H₂S del biogás, que se basa en la oxidación del sulfuro de hidrógeno para eliminar fácilmente los compuestos de azufre, como el azufre elemental (S⁰) o los

sulfatos (SO_4^{2-}), fijando el CO_2 como función estequiométrica de la oxidación del azufre (Ec. 14 a 17). A través de este proceso, es posible purificar el biogás, eliminando CO_2 y H_2S . Los cultivos puros o mixtos de microorganismos se utilizan en estudios de purificación. Dependiendo del tipo de microorganismos, el H_2S podría convertirse de sulfuros a azufre o, alternativamente, a sulfato, como se muestra en las reacciones (Ibrahim *et al.*, 2022; Varnero *et al.*, 2012).



Hay una gran variedad de microorganismos que pueden oxidar H_2S , que crecen en diferentes ambientes de temperatura y pH, que crecen en sistemas aeróbicos o aeróbicos, y tienen el potencial de purificar el biogás, Cuadro 7:

Cuadro 7. Bacterias aeróbicas y anaeróbicas en la purificación de biogás.

Bacteria	Género	Referencias
Aerobic	<i>Acidianus</i> , <i>Acidithiobacillus</i> , <i>Aquaspirillum</i> , <i>Aquifex</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Beggiota</i> , <i>Methylobacterium</i> , <i>Paracoccus</i> <i>Pseudomonas</i> , <i>Starkeya</i> , <i>Sulfolobus</i> , <i>Thermitiobacillus</i> , <i>Thiobacillus</i> y <i>Xanthobacter</i> .	(Friedrich <i>et al.</i> , 2001; Kuo-Ling <i>et al.</i> , 2013; Wei-Chih <i>et al.</i> , 2013; Zdeb, 2013)
Anaerobic	<i>Allochromatium</i> , <i>Chlorobium</i> , <i>Rhodopseudomonas</i> , <i>Rhodovulum</i> <i>Thiocapsa</i>	(Varnero <i>et al.</i> , 2012)

Cerrón y Matos (2013) estudiaron la eliminación de H_2S de un biofiltro a base de compost (consorcio bacteriano) y sustrato orgánico en un reactor de lecho fijo. En esta investigación el caudal de biogás fue de 4 L min^{-1} , primero, el flujo de biogás pasa a través de un filtro humidificador para mantener la humedad y luego al filtro de lecho fijo con compost, el tiempo de residencia del biogás fue de 10.80, 27 y 43.20 s a temperatura ambiente. Antes del proceso de filtrado de biogás, el biogás inicial estaba compuesto de 55-70% CH_4 , 30-45% de CO_2 y 3% de H_2S . Este estudio muestra que

la mayor eliminación de H₂S fue con un tiempo de residencia más largo de 43.20 s y se eliminó 100% H₂S. Este proceso fue eficiente en la mejora del biogás, el uso de compost puede ser una alternativa viable.

Kuo-Ling *et al.* (2013) evaluaron la eliminación de sulfuro de hidrógeno del biogás utilizando un proceso biológico-químico con la especie *Acidithiobacillus ferrooxidans* CP9, metabolizando azufre y se les proporcionó suficiente nivel de hierro férrico para un sistema estable. Se operó un biorreactor a escala de laboratorio durante 311 días, 0-20 g L⁻¹ de nivel de hierro férrico y 18 a 42°C de temperatura del biorreactor. La composición de biogás fue 61% CH₄, 26% CO₂ y 1645 ppm de H₂S. Los resultados muestran que el 98% del H₂S fue eliminado en un período operativo de 311 días (Cuadro 8). El estudio demostró la viabilidad del uso de *Acidithiobacillus ferrooxidans* CP9 para la mejora del biogás.

Wei-Chih *et al.* (2013) utilizaron un proceso químico-biológico para eliminar el H₂S del biogás a escala piloto. Este proceso se llevó a cabo con biogás procedente de estiércol de vaca, el biorreactor se inoculó con *Acidithiobacillus ferrooxidans*, el segundo reactor con un reactivo químico, y variando la concentración de entrada de H₂S. La composición inicial del biogás fue 59% CH₄, 21% CO₂ y 3542 ppm H₂S, el caudal de biogás de 50 a 100 L min⁻¹, el biorreactor se operó a 30 min h⁻¹ y 12 h día⁻¹. El estudio logró una eficiencia de eliminación del H₂S del 90-95%, entre 288 y 144 s, en 16 días de monitoreo. Estos resultados demuestran que el proceso químico-biológico es eficiente en la purificación de biogás.

Zdeb (2013) estudió la eficiencia de eliminación de sulfuro de hidrógeno del biogás con mineral de hierro de pantano, incorporado a la desulfuración biológica en la planta de tratamiento de aguas residuales "Hajdów". El estudio utilizó bacterias oxidantes de azufre *Thiobacillus (tiooxidans y thioparus)* y *Sulfolobus*. El biogás crudo tenía entre 55 y 80% de metano, <40% de dióxido de carbono y hasta 1110 ppm de H₂S. Comparando los resultados de la eliminación de H₂S, se observó que utilizando sólo mineral de hierro de pantano elimina entre 75.1 y 89.9%, mientras que el proceso biológico mejora la eficiencia entre 97.6 y 99.5% (Cuadro 8). Por lo tanto, el uso de bacterias oxidantes de azufre es eficiente para la mejora del biogás.

Ibrahim *et al.* (2022) evaluaron la eliminación biológica de H₂S en un sistema de biofiltro a escala piloto a partir de biogás. El filtro biopercolador se inoculó con un consorcio oxidante de H₂S y fue diseñado para procesar un ft³min⁻¹ (SCFM) de biogás, el biogás de entrada se suministró con 0.5 - 1 L min⁻¹, el tiempo de retención de 60 a 120 s a temperatura ambiente. El biogás inicial estaba compuesto por 45.5% de CH₄, 35% de CO₂ y 730 a 2000 ppm de H₂S. Los resultados muestran la eficiencia máxima de eliminación de H₂S del 94% y la capacidad del biofiltro para eliminar 24 g de H₂S m⁻³ h⁻¹. Además, Ibrahim *et al.* (2022) estudiaron la mejora del biogás mediante la eliminación química y biológica de H₂S. Se utilizó un biogás sintético (95.69% CO₂, 4.3% de aire comprimido y 0.005% de H₂S) y el sulfato férrico como agente oxidante para H₂S, 6, 10, 12 y 17 g Fe³⁺ L⁻¹ las concentraciones de la solución de hierro férrico se utilizaron a temperatura ambiente. Este proceso de purificación fue eficiente para la eliminación de H₂S a 15 g L⁻¹ de hierro férrico y un tiempo de residencia de siete minutos.

Cuadro 8. Comparación del método biológico para la eliminación de H₂S.

Especies	Entrada de biogás (L m ⁻¹)	H ₂ S Inicial (ppm)	H ₂ S Final (ppm)	H ₂ S Eliminado (%)	Referencias
Consorcio microbiano	0.92	141-190	0	100	(Cerrón y Matos, 2013)
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> CP9	-	1645	49.35	97	(Kuo-Ling <i>et al.</i> , 2013)
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	-	3542	177.1	95	(Wei-Chih <i>et al.</i> , 2013)
<i>Thiobacillus/Sulfolobus</i>	-	1110	5.55	99.5	(Zdeb, 2013)

El consorcio bacteriano o bacterias específicas ha sido un tratamiento adecuado para eliminar el H₂S del biogás, sin embargo, es importante contar con las condiciones óptimas para maximizar la eliminación del H₂S. Podría ser uno de los retos más importantes en la purificación del biogás. Además, los microorganismos nativos o los consorcios de microorganismos podrían ser otra alternativa viable a la mejora del biogás.

2.7 Ventajas y desventajas de los procesos

Como ya se ha visto a lo largo de este estudio, existe una amplia variedad de alternativas físicas, químicas y biológicas para eliminar el CO₂ y el H₂S en diferentes condiciones. A partir de los estudios, se han observado diferentes ventajas y desventajas que podrían ser un punto de inflexión en cuanto al uso de tecnologías, como se presenta en el Cuadro 9. Es importante mencionar que los procesos requieren ser accesibles, es decir, de infraestructura y reactivos de bajo costo, de fácil operación, que no generen residuos, y bajo el enfoque sostenible.

Cuadro 9. Ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías de purificación de biogás.

Método	Reactivos	Ventajas	Desventajas
Físico	H ₂ O	Eliminación del 99% de CO ₂ y H ₂ S. 95-98% de metano recuperado. Disponibilidad de agua Operación simple.	Necesita mucha agua. Requiere un sistema de bombeo. Aumento de temperatura. Tratamiento de aguas residuales. Infraestructura. Genera CO como gas tóxico. Riesgo de crecimiento bacteriano. Se requiere secado antes de usar cualquier aplicación
Químico	Cal sodada	Alta selectividad de CO ₂ . Rápida absorción. Eficiente en la eliminación de CO ₂ .	Dependencia y altos costos del producto químico. A la conclusión se debe descartar su eficacia o un tratamiento adecuado. Infraestructura compleja.
Químico	MEA	Una mayor concentración mejora la absorción de CO ₂ . Altamente eficiente (95–98% CH ₄) Sin riesgo de crecimiento bacteriano (pH alto).	Su uso es caro. La concentración y el flujo de biogás son factores que influyen en la purificación. Regeneración incompleta. Corrosión. Disposición
Químico	Ca (OH) ₂	Alta selectividad al CO ₂ Bajo costo. Disponibilidad en el mercado. Una vez finalizada su reactividad, tiene aplicaciones agrícolas como mejorador de suelos.	Absorbe humedad fácilmente.
Químico	Óxido de hierro	Disponibilidad. Pretratamiento fácil y de bajo costo Bajo costo. 100% de H ₂ S eliminado Reciclaje	Requiere tratamiento antes de su uso.
Biológico	Microalga	Genera biomasa. >85% de metano recuperado. Proceso integral.	Proceso lento Requiere instalaciones adecuadas. Al tener la presencia de CH ₄ y O ₂ , puede generar fuego.

		Pueden utilizarse especies endémicas. amigable con el medio ambiente. Se pueden utilizar especies nativas	El proceso costoso si se utilizan especies aisladas.
Biológico	Consortio microbiano	Genera fertilizante de azufre. No contamina Bajo costo Se pueden utilizar especies nativas	Requiere la adaptación de microorganismos. Sensible a los cambios ambientales.
Biológico	Cianobacteria	Genera biomasa Absorción del 95% de CO ₂	Proceso lento. Aislamiento y adaptabilidad de la especie. Sensible a los cambios ambientales.

Fuente: elaboración propia (2023).

En este estudio, se ha observado que la mayoría de los procesos de purificación de biogás se han llevado a cabo a escala de laboratorio, muy pocos a escala real, en un proceso semicontinuo, y pocos en un proceso continuo. Los procesos a escala de laboratorio se pueden controlar fácilmente, sin embargo, en los procesos a escala real los factores que influyen en la purificación del biogás ya no se pueden controlar. Además, la mayoría de los procesos pueden requerir una infraestructura compleja, los reactivos químicos caros y el uso de especies puras sería costoso. Además, la operación energética, los gastos operativos y la eliminación de residuos podrían generar otro problema. En el mercado podría haber algunos reactivos químicos disponibles y a bajo costo que pueden ser regenerados o pueden ser reciclados como residuos de hierro, biocarbono, cal viva, o especies nativas (microalgas, bacterias u hongos), que podrían ser alternativas viables en el mejoramiento de biogás a escala real y en procesos continuos, en la industria o biodigestores rurales.

2.8 Perspectivas futuras

En procesos físicos, químicos y biológicos, se han encontrado muchos procesos de purificación prometedores para eliminar CO₂ y H₂S, considerando que estos métodos fueron evaluados bajo diferentes condiciones. Se observó que la mayoría de los estudios se han probado a escala de laboratorio y no a escala real. Es importante que cuando se realice un estudio de purificación, se consideren los sustratos a utilizar, que sean de bajo costo, accesibles, post-tratamiento, respetuosos con el medio ambiente, seguros, y sobre todo que los procesos sean fáciles de operar.

En los métodos físicos, se ha propuesto el uso del agua como absorbente natural, pero esto no podría considerarse un proceso completamente viable a escala real, debido a la cantidad de agua utilizada. Aunque se ha obtenido una eficiencia superior al 90% a escala de laboratorio o piloto, valdría la pena proponer un tratamiento alternativo para las aguas residuales o su incorporación en biodigestores. Para ello, sería importante caracterizar las aguas residuales y determinar sus propiedades físicas y químicas.

Los procesos químicos (bases fuertes) han sido los más eficientes para eliminar CO₂ y H₂S por encima del 90%, pero el uso de sustancias químicas diluidas podría generar residuos adicionales, que podrían requerir tratamiento o neutralización. Además, se ha observado que el uso de soluciones a bajas concentraciones no es factible, ya que su eficacia se reduciría rápidamente y actuaría como un reactivo limitante. Por esta razón, muchos autores han propuesto utilizar bases fuertes para aumentar la vida útil del reactivo. Asimismo, sería interesante seguir evaluando sustratos orgánicos en forma de biocarbono activado o residuos de hierro en la eliminación de CO₂ y H₂S.

Los métodos biológicos son novedosos en la purificación del biogás, muchos estudios han buscado la posibilidad de incorporar microalgas y cianobacterias, demostrando su efectividad con más del 90%. Sin embargo, los estudios se han realizado a escala de laboratorio o a escala piloto. Incorporar estos sistemas de depuración a escala real sería interesante para el aprovechamiento integral de los residuos orgánicos.

El proceso de mejora del biogás pretende ser completamente sostenible, es decir, tratar los residuos orgánicos y producir biofertilizantes y metano (>95%), para generar un proceso rentable y cero residuos. Esto permite al usuario final (empresa y/o agricultor) producir biogás de forma sencilla, con materiales baratos y disponibles. El biogás por digestión anaerobia y purificación de biogás contribuye a reducir la emisión de gases de efecto invernadero, recuperar residuos, generar energía asequible y no contaminante, y alcanzar la agenda 2030 para el desarrollo sostenible.

Abreviaturas: CH₄: metano; IPCC: grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático; CO₂: dióxido de carbono; PSA: adsorción por oscilación de presión; NOM: número de octanaje del motor; CA: corriente alterna; CaO: óxido de calcio; CV, carbón vegetal; MEA: monoetanolamina; ppm: partes por millón; GEI: gases de efecto invernadero; Ca(OH)₂: hidróxido de calcio; NaOH: hidróxido de sodio; KOH: hidróxido

de potasio; CaCO_3 : carbonato de calcio; H_2S : sulfuro de hidrógeno; NaHCO_3 : bicarbonato de sodio; TA: temperatura ambiente; Fe_2O_3 : óxido de hierro; HCl: ácido clorhídrico; H_2O_2 , peróxido de hidrógeno.

Agradecimientos

al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), a la Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical de la Universidad Autónoma de Chiapas, al Cuerpo Académico de Agroforestería Pecuaria y al Centro Mexicano para la Producción más Limpia del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo otorgado.

2.9 Determinación de costos

Costo es una palabra muy utilizada, pero nadie ha logrado definirla con exactitud, debido a su amplia aplicación, pero se puede decir que el costo es un desembolso en efectivo o en especie hecho en el pasado, en el presente, en el futuro o en forma virtual, véase algunos ejemplos: los costos pasados, que no tienen efectos para propósitos de evaluación, se llaman costos hundidos, a los costos o desembolsos hechos en el presente (tiempo cero) en una evaluación económica se le llama inversión, en un estado de resultado proforma, se utilizarían los costos futuros y el costo de oportunidad, sería como costo virtual (Baca, 2001).

2.9.1 Costo de inversión

Los costos de inversión son todos aquellos costos que se dan desde la concepción de la idea que da origen al proyecto hasta poco antes de la producción del primer producto o servicio (Dotres *et al.*, 2020).

2.9.2 Costo de operación

Los costos de operación son necesarios para el funcionamiento y son permanentes durante los procesos productivos, ya que son erogaciones para adquirir insumos, materiales y demás recursos necesarios para que una organización o proyecto pueda operar (Rojas *et al.*, 2017).

2.9.2.1 Costos variables

Los costos variables son costos que cambian y evolucionan en paralelo con el volumen de las actividades de una empresa (si la actividad sería nula, los costos serían prácticamente cero), si la actividad aumenta el costo también aumenta, el costo

variable es la suma de los costos marginales en todas las unidades de producción, los costos fijos y los costos variables constituyen el costo total (Arellano *et al.*, 2017).

2.9.2.2 Costos fijos

Estos normalmente no dependen del volumen o actividad de la empresa, es una cantidad determinada de valor monetario que se tiene que pagar, lo que puede llegar a convertirse en pérdidas y cargas dentro de un proyecto o empresa. Este se mantiene fijo en ciertos periodos de tiempos en la totalidad del costo, independiente si ocurren cambios en actividad o volumen en la empresa (Arellano *et al.*, 2017).

2.9.3 Depreciación anual

Es el costo por el uso del activo fijo, ya sea construcciones, maquinaria, equipo, etc., el cual será utilizado en alguna actividad productiva. En proyectos se considera la depreciación lineal o constante. Algunas instituciones financieras, de forma práctica, proponen un porcentaje de depreciación lineal anual a partir del valor inicial (Baca, 2013).

Se contabiliza la depreciación de un activo a partir de que empieza a operar el proyecto.

Fórmula:

DA: Depreciación Anual

VI: Valor Inicial o Comercial

VU: Vida Útil o técnica

$$DA = \frac{VI}{VU}$$

2.9.4 Costos económicos

En los costos económicos se consideran todos los factores empleados en la producción, incluyendo aquellos que financieramente no son reconocidos como costos: costo de la tierra (propiedad del productor), costo del capital propio invertido en gastos de operación o capital de trabajo, construcciones, e instalaciones, maquinaria y equipo; mano de obra del productor y familiar, y gestión empresarial (Sagarnaga *et al.*, 2014).

2.9.5 Costo de la mano de obra del productor o familiar

Para evaluar el costo de la mano de obra del productor se determinan las horas totales que éste dedica a realizar labores directamente relacionadas con la actividad productiva, mismas que se transforman en número de jornales equivalentes al dividirlos por el número de horas de trabajo que implica un jornal similar en la zona. Al multiplicar el número de jornales equivalentes por el precio del jornal en el mercado de trabajo local, se determina el costo de la mano de obra del productor (Sagarnaga *et al.*, 2014).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del área de estudio

La presente investigación se realizó en el Rancho “El Saucedal”, en el municipio de Villaflores Chiapas. Con las coordenadas de 16°14'01" de latitud norte y 93°16'00" de longitud oeste y se ubica a una altitud de 560 metros sobre el nivel del mar. Villaflores ocupa una superficie territorial de 1899.96 km² ocupa el 2.54% del territorio estatal. Donde se encuentra instalado un biodigestor de 10 m³ operado con estiércol bovino. El reactor anaerobio opera de manera estable y genera un promedio de biogás de 3.75 m³ día⁻¹ con temperatura promedio interna de 30° grados centígrados (Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas [CEIEG], 2021).



Figura 6. Localización del área de estudio
Elaboración propia (2023).

3.2 Materiales

- 3 tubos de PVC de 20, 40 y 60 cm para los medios filtrantes de 4" de diámetro respectivamente.
- 6 coples de PVC de 4"
- 6 tapas de PVC de 4"
- 3 adaptadores macho de PVC de 2"
- 3 tapones con rosca de polipropileno de 2"
- 3 nipples terminales de ¼ x ¾ de gas
- 3 coples Espiga Tuerca Giratoria (tuerca Loca) 3/8 de gas
- 5 adaptador macho de ½ pulgada de CPVC
- 5 adaptador hembra de ½ pulgada de CPVC
- 1 tuerca unión de ½ de CPVC
- 20 cintas teflón
- 4 tubitos de 5 cm de ½ CPVC
- 1 tubo de 5 cm de 2" de PVC
- 1 tubo de PVC de 60 cm de 2" de diámetro
- 1 tuerca unión de 2" de PVC
- 2 tapas de 2" de PVC

- Pegamento para PVC
- 1 sellador blanco acrílico de 300 ml
- 50 cm de manguera de ½ de agua
- 1 metro de manguera para gas
- 2 abrazaderas para gas
- 1 jeringa de 3 ml
- 25 kg de Ca(OH)₂
- 9 kg de óxido de hierro
- 3 metros de manguera de pecera
- 16 sujetadores
- 16 cinchos de plásticos de 100 mm x 2.5 mm
- 16 llaves de 3 vías
- 16 bolsas de 5 kg
- Bolsa para enema de 1500 ml
- Agua

3.3 Herramientas

- 1 taladro
- 1 broca de ½ pulgada
- 16 globos de helio para transportar la muestra.
- 1 tijera
- 1 flexómetro
- 1 cegueta
- Balanza digital de 5 kg
- Equipo Multitec 540

3.4 Enfoque metodológico

3.4.1 Activación de biodigestor anaerobio y caracterización del biogás

En la presente investigación se trabajó con un biodigestor de 10 m³ que opera con estiércol bovino con una relación 3:1 (agua: estiércol) (FAO, 2011) . Después de asegurar que se tenía un proceso anaeróbico adecuado, se realizó la caracterización del biogás tomando muestras del biodigestor de la unidad de producción con un globo usado para helio, el cual fue transportado al Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables de la UNICACH, donde se analizaron los componentes de la mezcla con la utilización del Equipo Multitec 540 (Gómez, 2014; Vázquez, 2016).



Figura 7. Colaboración institucional y herramientas de trabajo.

3.4.2 Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) donde se tomó en cuenta la combinación de la altura de filtro y el peso del hidróxido de calcio, éste generó cuatro sistemas de purificación A, B, C y un testigo, donde fueron evaluados la eficiencia en la purificación de metano, eliminación de CO_2 y H_2S . Además, de utilizar variables homogéneas para todos los experimentos como es la cantidad de óxido de hierro (Fe_2O_3), solución base hidróxido de calcio y flujo de biogás. Cada sistema contó con cinco repeticiones, dando un total de 20 observaciones, como se observa en el cuadro (10), con el propósito de obtener el mejor sistema en la recuperación de metano y eliminación de impurezas (CO_2 y H_2S). Todos los experimentos fueron analizados con un ANOVA con un nivel de significancia del 5% e intervalo de confianza al 95%, y una prueba de Tukey.

Cuadro 10. Combinación de altura y peso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para los sistemas de purificación.

Sistemas de purificación	Altura de filtro (cm)	Peso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (g)	Repeticiones
A	20	700	5
B	40	1880	5
C	60	2880	5
Testigo comercial	40	1880	5

3.4.3 Construcción de filtros y preparación de reactivos

Para la altura o distancia, diámetro y tipo de material de los filtros se tomaron algunos datos empleados por Elizondo y Herrera (2012). Que fue de 1" y 80 cm de largo de material de PVC, no obstante, para el caso de este estudio se modificó la altura o distancia a 20, 40 y 60 cm y se aumentó el diámetro del filtro a 4" porque se consideró muy reducido el espacio para agregar los medios filtrantes.

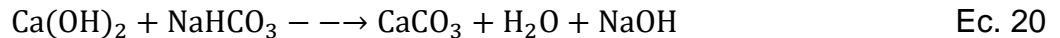
Para el desarrollo del sistema de purificación se construyeron cuatro filtros de material de PVC uno de 20 cm (sistema A), otro de 40 cm (sistema B), 60 cm de altura (sistema C) y un testigo de 40 cm con un diámetro de 4", estos fueron sellados con tapas y coples de la misma medida con pegamento de PVC, todos tuvieron una entrada de biogás con adaptadores macho y hembra de ½ pulgada de CPVC. Para la salida de biogás se usaron adaptadores macho y tapones con rosca de polipropileno de 2", unido a éstos se les incorporaron niples terminales de 3/8 x 1/4 de gas y coples Espiga Tuerca Giratoria (tuerca Loca) 3/8 de gas, y al final una jeringa de 3 ml con una llave de 3 vías para la toma de muestra de biogás. Los sistemas de purificación de manera individual fueron precedidos y unidos por un filtro de 60 cm y 2" de diámetro, con salida y entrada de biogás de ½ pulgada de diámetro de CPVC construidos para la remoción del H₂S con Fe₂O₃ (previamente tratado). La unión del filtro de H₂S se conectó con una tuerca unión a los filtros de remoción de CO₂ con conexiones de ½ pulgada de CPVC.

De la misma forma se oxidó limadura de fierro obtenido de un torno y soldadura, basándose en la metodología de Heredia (2011), donde utilizó 8 clavos en 200 ml de agua para observar el proceso de oxidación del fierro. El cual fue modificado debido a la cantidad de fierro a emplear en el estudio se remojo 15 kg de limadura de fierro en una cubeta de 20 litros aforado hasta llenarse por 48 horas. Después de remojar se expuso al sol para secarse, además de hacer aspersion de agua durante una semana para lograr obtener el óxido de hierro (Fe₂O₃) (Vazquez, 2016). De este reactivo se usaron 600 g para todos los tratamientos experimentales (Figura 8).



Figura 8. Preparación de óxido de hierro (Fe_2O_3).

Para la preparación del hidróxido de calcio se basó de la metodología empleada por Ghatak y Mahanta (2016), que tiene el siguiente principio en la reacción química en una solución seca en un productor comercial denominado cal sodada.



De los componentes de la mezcla de cal sodada que vienen en porcentajes, se buscó la disponibilidad en la región, la cual se encuentra en las ferreterías a precios accesibles. Se realizaron pruebas agregando 15 ml de agua en 80 g de cal y agitándolo con una botella, pero no se logró formar la cal en forma de pellets.

Por lo que se creó la siguiente metodología para la elaboración de la cal artesanal:

1. Se procede a pesar 80 g de cal (Calidra) con una báscula capacidad 5 kg digital marca Truper, previamente calibrada.
2. En una bolsa de plástico se esparce de manera uniforme y con la ayuda de una jeringa de 20 ml se toman 20 ml de agua, la cual se le aplica en forma distribuida en la cal y con la bolsa se empieza hacer movimiento de un lado a otro para hacerlo en forma de pellets durante 1.20 minutos.
3. Una vez obtenido la hidratación de la cal, se repiten 10 veces para llegar a 800 g L^{-1} .

4. Se realizó el tamizado para permitir que queden las partes más grandes, después fueron pesados de acuerdo a la capacidad de llenado de cada filtro, que fue de 700 g para el filtro de 20 cm, 1880 g para el de 40 cm y 2880 g para el de 60 cm. Para el testigo el peso fue similar al filtro de 40 cm con 1880 g de cal sodada.

3.4.4 Proceso de purificación de biogás

El sistema de purificación estuvo constituido para su aplicación en 2 fases, es decir un filtro de eliminación de H_2S y otro de CO_2 . La primera fase consta de un filtro de 60 cm de altura con 600 g de óxido de hierro para la eliminación del ácido sulfhídrico, el cual, se conectó al segundo filtro donde se agregó una solución base de 800 g L^{-1} de $Ca(OH)_2$ a un flujo de biogás de 1.83 L min^{-1} .

El proceso de purificación se llevó a cabo con el ingreso del biogás procedente del biodigestor anaerobio al primer filtro de 60 cm (figura 9 y 10) donde se agregó 600 g de óxido de hierro para eliminación del ácido sulfhídrico y segundo por el filtro de remoción de CO_2 donde se agregó el hidróxido de calcio con sus respectivos pesos de acuerdo al diseño experimental. Se tomaron muestras de cada tratamiento en la salida de los filtros con la ayuda de globos de helio de capacidad de 1 L, que después fue llevada al Instituto de Energías Renovables de la UNICACH, para su evaluación con el equipo Multitec 540, este dispositivo está diseñado para determinar CH_4 (%), CO_2 (%), H_2S (ppm), O_2 (%), CO (ppm).

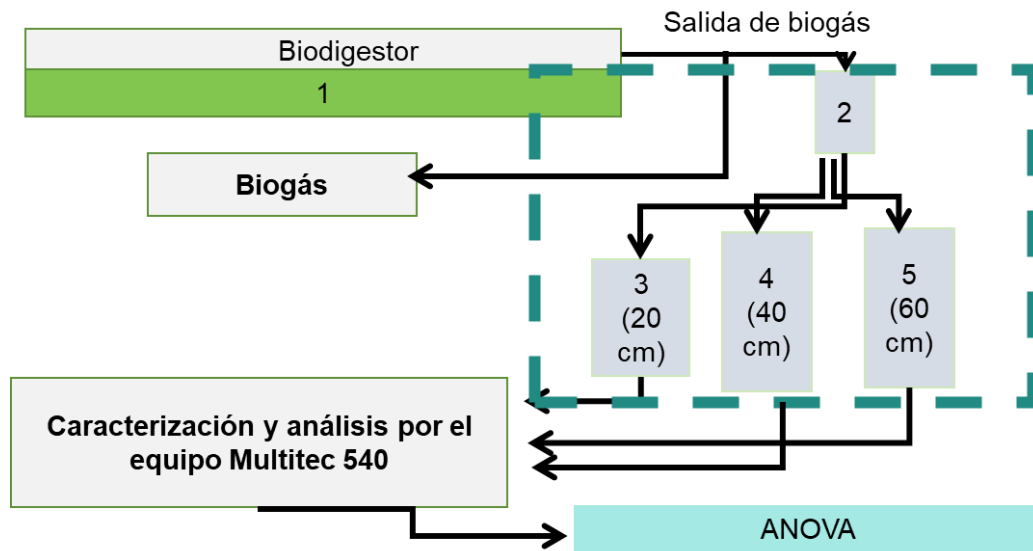


Figura 9. Proceso de purificación de biogás: (1) biodigestor, (2) filtro Fe_2O_3 para eliminar H_2S , (3, 4, 5) filtros con $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

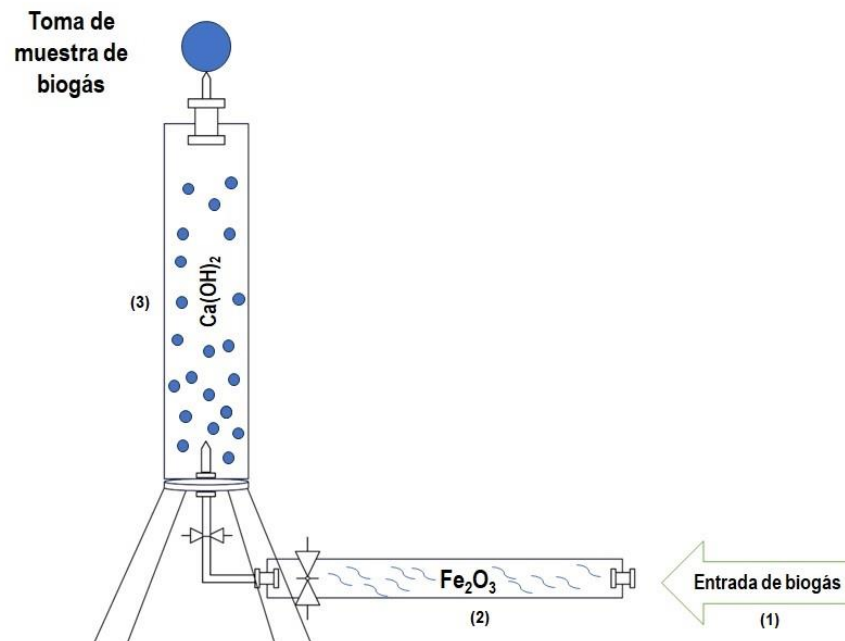


Figura 10. Proceso de purificación de biogás: (1) Flujo de biogás, (2) filtro Fe_2O_3 para eliminar H_2S , (3) filtro con $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

3.4.5 Evaluación de la capacidad de absorción

Una vez evaluada la eficiencia en la purificación, se estimó la capacidad de absorción de los filtros con base al peso de Ca(OH)_2 (Calidra de bajo costo) utilizado en cada sistema y testigo (cal sodada -producto comercial-), para ello nos basamos en la reacción estequiométrica del hidróxido de calcio y del dióxido de carbono, (ecuación 21)



Se usó esta ecuación para conocer la capacidad que tiene el hidróxido de calcio en absorber CO_2 (Ghatak y Mahanta, 2016). Dado que el resultado es obtenido en (g), se utilizó la ley de Avogadro para gases (ecuación 22) para conocer el CO_2 en volumen de cada sistema de purificación.

$$V_i = V_m \left(\frac{m_i}{M_i} \right) \quad (\text{Ec. 22})$$

Después se utilizó la concentración del CO_2 procedente del biodigestor que fue del 42% (0.42 L), para realizar los cálculos del volumen de biogás filtrado, volumen de biogás absorbido y biometano puro en los sistemas de purificación con base a su medio filtrante.

3.4.6 Cálculo del volumen de CO_2 de acuerdo con el biogás producido.

1000 ml – 100% de Biogás

= 420 ml – 42% de CO_2

1 L de biogás – 0.420 L de CO_2

3.4.7 Evaluación de la capacidad de absorción del sistema A

$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2$

$$74 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + \frac{44\text{g}}{\text{mol}}$$

$$700 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 416.21 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ de } \text{CO}_2$$

Ley de Avogadro para gases

V_m = Volumen molar

V_i = Volumen de gas

m_i = masa (g)

M_i = masa molar

$$V_m = 22.41 \frac{\text{L}}{\text{mol}}$$

$$V_i = V_m \left(\frac{m_i}{M_i} \right)$$

$$V(\text{CO}_2) = 22.41 \frac{\text{L}}{\text{mol}} * \frac{416.21 \text{ g}}{\frac{44 \text{ g}}{\text{mol}}} = 211 \text{ L de CO}_2$$

1 L de biogás – 0.420 L de CO₂

502 L de biogás – 211 L de CO₂

291 L de biometano final

3.4.8 Evaluación de la capacidad de absorción del sistema B

Ca (OH)₂ + CO₂

$$74 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + \frac{44 \text{ g}}{\text{mol}}$$

1880g + 1117.83 g de CO₂

Ley de Avogadro para gases

V_m = Volumen molar

V_i = Volumen de gas

m_i = masa (g)

M_i = masa molar

$$V_m = 22.41 \frac{\text{L}}{\text{mol}}$$

$$V_i = V_m \left(\frac{m_i}{M_i} \right)$$

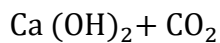
$$V(\text{CO}_2) = 22.41 \frac{\text{L}}{\text{mol}} * \frac{1117.83 \text{ g}}{\frac{44\text{g}}{\text{mol}}} = 569 \text{ L de CO}_2$$

1 L de biogás – 0.420 L de CO₂

1354 L de biogás – 569 L de CO₂

785 L de biometano final

3.4.9 Evaluación de la capacidad de absorción del sistema C



$$74 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + \frac{44\text{g}}{\text{mol}}$$

2880g + 1712.43 g de CO₂

Ley de Avogadro para gases

V_m = Volumen molar

V_i = Volumen de gas

m_i = masa (g)

M_i = masa molar

$$V_m = 22.41 \frac{\text{L}}{\text{mol}}$$

$$V_i = V_m \left(\frac{m_i}{M_i} \right)$$

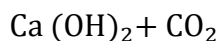
$$V(\text{CO}_2) = 22.41 \frac{\text{L}}{\text{mol}} * \frac{1712.43 \text{ g}}{\frac{44\text{g}}{\text{mol}}} = 872 \text{ L de CO}_2$$

1 L de biogás – 0.420 L de CO₂

2076 L de biogás – 872 L de CO₂

1204 L de biometano final.

3.4.10 Evaluación de la capacidad de absorción del sistema Cal sodada



$$74 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + \frac{44\text{g}}{\text{mol}}$$

$$1760\text{g} + 1046.48 \text{ g de CO}_2$$

Ley de Avogadro para gases

$$V_m = \text{Volumen molar}$$

$$V_i = \text{Volumen de gas}$$

$$m_i = \text{masa (g)}$$

$$M_i = \text{masa molar}$$

$$V_m = 22.41 \frac{\text{L}}{\text{mol}}$$

$$V_i = V_m \left(\frac{m_i}{M_i} \right)$$

$$V(\text{CO}_2) = 22.41 \frac{\text{L}}{\text{mol}} * \frac{1046.48 \text{ g}}{\frac{44\text{g}}{\text{mol}}} = 532.74 \text{ L de CO}_2$$

$$1 \text{ L de biogás} - 0.420 \text{ L de CO}_2$$

$$1268 \text{ L de biogás} - 532.74 \text{ L de CO}_2$$

$$736 \text{ L de biometano final.}$$

3.4.11 Costos en los sistemas de purificación de biogás

Para calcular la estructura de costos en los sistemas de purificación, se adaptó la metodología de Llaneza *et al.* (2010), con la cual se calculan los costos por metro cúbico. Además, se tomó en cuenta la mano de obra familiar (MOF) como costo de oportunidad ya que no tiene remuneración económica. A su vez, el costo de purificar fue expresado en pesos mexicanos y dólares.

Después de comparar la eficiencia de los filtros y los medios de purificación, así como la evaluación de la capacidad de absorción, se procedió a analizar los costos en

purificación por metro cúbico de biogás en los tres filtros y los reactivos elaborados artesanalmente (Calidra) y comercial (Sodalime).

Lo primero en calcular fue el costo de inversión, para ello, se tomaron en cuenta los costos de los materiales utilizados para la elaboración de cada filtro según su tamaño con base a los precios promedio del año 2023. Costo de la mano de obra del tiempo invertido para la elaboración de los filtros, los cuales fueron agregados en una tabla de Excel para realizar la sumatoria y estimar el costo de inversión para cada sistema. Lo anterior se calculó de acuerdo a la cantidad de biogás producido diario ($3.75 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$) durante 3 años, que es lo que representa la vida útil de los filtros.

$$\text{Costo de inversión} = \frac{\text{Costo de materiales} + \text{costo de elaboración de filtro}}{\text{Volumen de Biogás por año} * \text{vida útil}}$$

Seguido a esto, se calcularon los costos de operación que comprende los costos variables y fijos, dentro de los variables se consideró la cantidad de Calidra utilizada, agua, cal sodada, óxido de hierro y teflón.

La mano de obra familiar para la elaboración de los medios filtrantes artesanales, tamizado y pesaje (se consideró como un costo de oportunidad) y se sumó a los costos de operación (costos fijos más costos variables), de esta forma se obtuvo el costo económico, considerando a todos los costos en el proceso de purificación. Cabe destacar que, si no se considera el costo de oportunidad de la mano de obra familiar, el costo total es menor. Dentro de los costos fijos se consideró la depreciación del filtro (materiales), con vida útil de tres años.

$$\text{Costos de operación} = \text{Costos variables} + \text{Costos fijos}$$

Luego se procedió a estimar los costos económicos totales en los sistemas de purificación para un metro cúbico de biogás, sumando los costos de inversión, de operación y de oportunidad de la mano de obra (familiar). De igual forma se realizó el análisis sin considerar el costo de oportunidad de la mano de obra familiar.

$$\begin{aligned} \text{Costo Económico total purificación} \\ = \text{Costo de inversión} + \text{Costo de operación} + \text{costo de oportunidad} \end{aligned}$$

$$\text{Costo total purificación (sin MOF)} = \text{Costo de inversión} + \text{Costo de operación}$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de obtener todos los datos de los ensayos experimentales se realizaron los análisis estadísticos por medio del ANOVA con el software Minitab 19, este arrojó un valor de $p=0.000$, es decir, existen diferencias entre los tratamientos en la purificación de biogás ver cuadro 11.

Cuadro 11. Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Filtros	3	622.5	207.517	26.27	0.000
Error	16	126.4	7.900		
Total	19	748.9			

Para conocer las diferencias entre los tratamientos se realizó una prueba de Tukey, la cual mostró la mayor recuperación de metano para el tratamiento testigo con un 97.6% de pureza, seguido por el sistema B con una recuperación promedio de 91.6% de metano, y los sistemas A y C no existen diferencias entre ellos. Ver cuadros 12 y 13.

Cuadro 12. Medias de los sistemas de purificación

Filtros	N	Media	DE
A	5	86.00	5.24
B	5	91.600	1.517
C	5	83.000	1.225
Testigo	5	97.600	0.548

También se puede observar que la desviación estándar en el sistema de purificación testigo está más cercano al 0, con resultado de 0.54. Esto permite dilucidar que los datos obtenidos están más cercanos a la media y es por ello que al realizar la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95% permitió agruparlo como el mejor tratamiento. A diferencia de los otros tratamientos donde el material se elaboró de manera artesanal y pudo interferir en los resultados.

Cuadro 13. Prueba de Tukey y un nivel de confianza de 95%

Filtros	N	Media	Agrupación
Testigo	5	97.600	A
B	5	91.600	B
A	5	86.00	C
C	5	83.000	C

Ghatak y Mahanta (2016) realizaron un estudio donde utilizaron el reactivo cal sodada y obtuvieron una concentración del 97.7% de CH₄, este resultado es igual al obtenido en este estudio con el tratamiento testigo. A diferencia del medio filtrante (Calidra), el cual se elaboró de forma artesanal, con el sistema B se obtuvo el segundo mejor resultado con una concentración del 91.6% de CH₄. En la eliminación de impurezas todos los tratamientos eliminaron el 100% de CO₂ y H₂S, a diferencia de los autores antes mencionados con 1.34% de CO₂ de remanente. Srichat *et al.* (2017) utilizaron Ca(OH)₂ a una concentración de 2 mol en solución acuosa, y lograron una concentración de 89.30% de CH₄ en un sistema que emplea energía convencional, ese resultado es similar a lo obtenido en este estudio con un 91.6% de CH₄ pero sin el uso de energía convencional. Maile *et al.* (2017), con el uso de sustancias químicas como el NaOH y Monoetanolamina, obtuvieron una concentración de 80 y 85% de CH₄ respectivamente, sin embargo, la eliminación del CO₂ no fue tan evidente ya que en un inicio contenía 46% y al final disminuyó a 17%. Los resultados derivados de la presente investigación sobre eliminación de elementos no deseados son convincentes, ya que se logró eliminar las impurezas de interés como el CO₂ y H₂S en esta investigación en un 100% y el olor característico (huevo podrido) de esta bioenergía, no fue percibido después del proceso de purificación. Por lo que el sistema B puede ser empleado para la limpieza del biogás al ser elaborado con material disponible en la región.

Cuadro 14. Comparación de reactivos en la recuperación de metano y eliminación de impurezas

Reactivos	Entrada de biogás	Entrada de reactivo	Inicial CO ₂ (%)	Final CO ₂ (%)	CH ₄ inicial (%)	CH ₄ recuperado (%)	Referencias
Soda lime	1 L min ⁻¹	5 bar	-	1.34	41.5	97.7	Ghatak y Mahanta (2016)
Ca(OH) ₂	5 L min ⁻¹	10 L min ⁻¹	39.6	-	51	89.30	(Srichat <i>et al.</i> , 2017)
NaOH	-	-	46	17	52	80	(Maile <i>et al.</i> , 2017)
MEA	-	-	46	15	52	85	(Maile <i>et al.</i> , 2017)
Ca(OH) ₂	1.83 L min ⁻¹	-	44	0	56.5	91.6	(Castellanos-Sánchez <i>et al.</i> , 2023)

Los resultados en la evaluación de la capacidad de absorción de los sistemas de purificación se observan en el cuadro 15, donde el sistema C tiene la mayor capacidad de absorción de CO₂ con 872 L, esto debido a que tiene mayor cantidad de hidróxido de calcio en peso (2880 g), esto permite que se sature menos, a diferencia de los demás sistemas donde el peso de Ca(OH)₂ es menor por lo tanto se satura más rápido, sin embargo, el porcentaje de eficiencia para este sistema es el menor en la concentración de metano con 83%. No obstante, este valor se encuentra en los parámetros de aceptabilidad para uso como bioenergético.

Cuadro 15. Capacidad de absorción de los sistemas de purificación

Sistemas de purificación	Biogás filtrado (L)	CO ₂ absorbido (L)	Biometano final (L)
A	502	211	291
B	1354	569	785
C	2076	872	1204
Testigo comercial	1268	532	736

La operatividad de los filtros es un reto actualmente, ya que, si el filtro con el medio de purificación logra filtrar el mayor volumen de biogás y retener las impurezas, se logra ahorrar tiempo y costos en el proceso, lo que conlleva a una buena accesibilidad del producto. Tippayawong y Thanompongchart (2010) estudiaron tres solventes químicos para la mejora del biogás, en una columna empacada con un tiempo de operación de 2 horas, la saturación del solvente $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a una concentración de 0.10 mol en una cantidad de 10 L de solución, se encontró que la saturación fue un tiempo de 50 minutos a diferencia del NaOH y MEA a los 100 minutos de saturación con la misma concentración, y el rango de absorción estaba entre los 0.28 y 0.22 kg de CO_2 por kg de reactivo. La concentración del reactivo es un factor a tomar en cuenta, ya que depende de ello la vida útil del filtro, es preciso recalcar la diferencia en concentración y cantidad utilizada del reactivo, porque el peso de la sustancia química permite mayor vida útil y la retención de impurezas aumenta, según con lo encontrado en el presente estudio, prueba de ello es el sistema C (filtro de 60 cm) donde su capacidad de filtración fue 2076 L de biogás y 0.59 kg $\text{CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ (absorción de 872 L de CO_2) a comparación de los filtros de 20 y 40 cm.

Vázquez (2016) logró filtrar 2800 L (2.8 m^3) de biogás con un porcentaje final de 56% de metano en un tiempo de operación de 30 minutos, utilizando 4 litros de agua con el sistema de recirculación, como resultado la eliminación de 29.6% de CO_2 inicial a 9% final, un valor demasiado bajo en comparación a lo obtenido en los filtros de este estudio, donde el solvente químico influyo en el resultado y se obtuvieron promedios superiores al 80% en concentración de metano. Esto muestra la diferencia entre utilizar un solvente químico que permite la mejora del biogás y con resultados prometedores, además de no utilizar energía eléctrica y mucha agua que requiere regeneración.

Mojica *et al.* (2016) filtraron 650 L de biogás, esto según la capacidad del compresor de $0.65 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a una concentración de 93.15% de metano final y eliminación de CO_2 de 30% a 8%, en diferentes condiciones de temperatura y presión. El sistema comprendía la recirculación de agua, una torre de secado con aserrín y carbón activado. Este resultado es superior al presente estudio, pero habría que evaluar los costos de purificación y la infraestructura.

Los resultados en los costos de purificación para cada sistema se muestran en el cuadro 15, donde se encuentra que el medio de purificación de los tres sistemas elaborados artesanalmente tiene costos similares. A diferencia donde se utilizó un medio químico comercial, que fue lo que realmente encareció el sistema, ya que el kilogramo de este producto comercial es de MXN\$ 133.37, en cambio la Calidra tiene un precio mucho más accesible, es decir, un precio de mercado de MXN\$ 4 por kilogramo. Lo que conlleva a utilizar la Calidra como alternativa y con muy buenos resultados en los sistemas de 20, 40, y 60 cm de altura. En donde para fines prácticos y mayor durabilidad se opta por el sistema C como más viable para su aplicación, en el proceso de purificación porque tarda más tiempo en saturarse y se ahorra tiempo, aunque el porcentaje de metano es inferior al sistema de A y B.

Cuadro 16. Costo de purificación de 1 m³ de biogás

Sistema de purificación	Costo de Inversión (MXN\$)	Costo de Operación (MXN\$)	Costo de oportunidad MO (\$)	Costo Económico (MXN\$)	Costo total S/MOF (MXN\$)	Costo total (US\$)
A	0.1735	6.65	22.58	29.23	6.82	0.4
B	0.1763	6.53	22.32	28.85	6.70	0.4
C	0.1791	6.51	22.62	29.14	6.69	0.39
Testigo (Sodalime)	0.1763	198.42	0.96	199.39	198.6	11.72

Sahu *et al.* (2020) en su desarrollo de un sistema de purificación de bajo costo basado en un filtro de 20 cm de altura con el uso de cristal de piedra caliza y silicagel, estimaron un costo de purificación de MXN\$ 4.91 (41000 Rs -rupias-). En el sistema anterior se observa un costo similar comparado con la presente investigación con promedio de MXN\$ 6 (cuatro sistemas). Sin embargo, faltaría considerar la operatividad del filtro y los residuos que se generan durante el proceso de purificación.

Algunos autores como Muñoz *et al.* (2015) y Rosa (2020) mencionan que el costo de purificación para 1 m³ de biogás en el método químico es de MXN\$ 3.09 (0.15 €), no obstante dichos autores no contemplan la infraestructura sino únicamente el costo de los reactivos. En este estudio fue de MXN\$ 6.50 promedio utilizando calidra (costo total sin considerar MOF), sin embargo, se contempla el costo de inversión, costos fijos y costos variables. Pero al considerar la mano de obra familiar el costo económico sube

a MXN\$ 29.00. Cabe destacar que la mano de obra familiar no tiene remuneración económica, pero debe ser considerada.

Así mismo, la FAO (2020) en Argentina en el 2019 para conectar biogás a una red de gas natural, estimó los costos de purificación basado en la tecnología de membranas, uso de carbón activado y energía eléctrica, el costo de purificación de un metro cúbico de biogás lo estimaron en MXN\$ 40.26 (2.40 US\$), lo que representa un costo muy alto en relación a los sistemas de purificación de este estudio que fueron en promedio MXN\$ 6.50 (sin considerar MOF) y promedio de MXN\$ 29 considerando el costo de oportunidad de la mano de obra familiar (ambos promedios para medios de purificación elaborados de manera artesanal). La misma organización afirma que para lograr su implementación requieren fuertes incentivos, esto lo vuelve no rentable y no competitivo.

Sriharti y Hidayat (2020) desarrollaron un sistema de purificación, donde utilizaron el método de adsorción con adsorbentes sólidos como la zeolita para eliminar el dióxido de carbono, polvo de hierro para eliminar el sulfuro de hidrógeno y gel de sílice para eliminar el vapor de agua. Estimaron que el costo de purificar un metro cúbico es de MXN\$ 2.4 (0.13 US\$). Es importante señalar que los costos fueron basados solamente en los insumos utilizados y no refleja el costo total, no contemplaron costos de inversión, mantenimiento ni mano de obra.

Makareviciene y Sendzikiene (2015) estudiaron la viabilidad del uso de dolomita en solución y suspensión, y monoetanolamina (MEA) para la purificación del biogás. Para calcular los costos de purificación tomaron en cuenta los gastos empleados en el uso de los reactivos. También se excluyó los costos en adquisición de equipos (compresión de biogás antes de la purificación) y depuradores. El costo para purificar un metro cúbico de biogás para la MEA fue de MXN\$ 26.18 (1.42 US\$), dolomita suspensión $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ MXN\$ 2.21 (0.12 US\$) y dolomita solución de MXN\$ 7.74 (0.46 US\$). Todos los costos de purificación estimados del estudio anterior difieren de la presente investigación con el uso de la Calidra. El costo de los reactivos es lo que encarece el proceso de purificación. Sin embargo, en la presente investigación, con el uso de Calidra, en conjunto con el sistema de purificación es una alternativa viable para el uso en la mejora de la calidad del biogás. Con este procedimiento económico se obtiene

biometano, al cual se le puede dar otro uso como la comprensión y como fuente de energía en motores de combustión interna.

Es una excelente opción para dar valor agregado al uso de biodigestores rurales, cabe señalar que el sistema de purificación de biogás tiene costos competitivos sin considerar el costo de oportunidad de la mano de obra familiar.

5. CONCLUSIONES

Esta investigación no hace uso de energía eléctrica en el proceso de purificación de biogás, por lo que se considera viable para su aplicación en lugares donde no exista energía eléctrica. El mejor sistema de purificación fue el testigo con una concentración del 97.7% de CH₄, sin embargo, es un producto comercial de alto costo. El segundo mejor resultado fue el sistema B con un promedio de 91.6% en concentración de metano, pero su capacidad de absorción es inferior al sistema C. Se logró la eliminación del 100% del CO₂ y H₂S en todos los sistemas de purificación.

La presente investigación presenta datos sobre la capacidad de absorción en los sistemas de purificación de forma teórica. En donde el sistema C tiene la mayor capacidad de absorción, al tener mayor cantidad de Ca(OH)₂ logra filtrar 2076 L de biogás.

El biogás al ser purificado no presenta el olor característico, por lo tanto, su uso como biocombustible no provoca ningún riesgo a la salud humana.

Los costos en los sistemas de purificación son muy similares, lo que permite la utilización de cualquier sistema de purificación para la mejora del biogás que se genera en biodigestores rurales, y para elegir la mejor opción se toma en cuenta la capacidad de absorción, por lo que el sistema C de 60 cm es el más viable.

Se realizó un análisis completo de costos de purificación de biogás (costos económicos), lo cual en la mayoría de investigaciones no se contempla, sin embargo, al contemplar la mano de obra familiar, los sistemas no son competitivos ya que el costo total incrementa en un 348%. Al no contemplar la mano de obra familiar (sin remuneración económica), los sistemas son competitivos con un costo promedio de los tres sistemas donde se utilizó calidra de MXN\$ 6.50 por m³.

6. LITERATURA CITADA

- Akkarawatkhoosith, N., Kaewchada, A., & Jaree, A. (2019). High-throughput CO₂ capture for biogas purification using monoethanolamine in a microtube contactor. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 98, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.05.002>
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452–466. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2018.01.011>
- Arango Gómez, J. E., Sierra Vargas, F. E., & Silva Leal, V. (2013). Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogás. *Revista Tecnura*, 18(39), 152. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.1.a11>
- Arellano Cepeda, O., Quispe Fernández, G., Ayaviri Nina, D., & Escobar Mamani, F. (2017). Estudio de la Aplicación del Método de Costos ABC en las Mypes del Ecuador. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 19(1), 33–46. <https://doi.org/10.18271/RIA.2016.253>
- Baca, U. . G. (2013). *Evaluacion de proyectos* (McGraw-Hill. (Ed.); 7a ed.).
- Baca, U. G. (2001). *Evaluación de proyectos* (McGRAWHILL (Ed.); 4a ed.).
- Bajracharya, R. T., Dunghana, A., Thapaliya, N., & Hamal, G. (2009). *Purification and Compression of Biogas : a Research*. 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.3126/jie.v7i1.2066>
- Barrera-Cardoso, E. L., Carabeo Pérez, A., Contreras-Velázquez, L. M., & López-González, L. (2018). Sistematización de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala industrial Systematization of theoretical digestion technologies aspects on full scale anaerobic. *Revista Tecnología Química*, 38(1), 29–45.
- Burgos, L. M. E. (2003). *Ciencia Unisalle Determinación del porcentaje de remoción de sulfuro de hidrógeno por biofiltración en la zona de influencia de la Central*

Hidroeléctrica El Paraíso.

- Camizán, V. J. L. (2015). *Estudio del tratamiento de emisiones gaseosas de sulfuro de hidrógeno a nivel piloto e industrial.* 3–4.
- Campuzano, C. O. (2017). *Estudio de la remoción del sulfuro de hidrógeno y de dióxido de carbono presente en el biogás, por medio de un reactor de columna de burbujeo operado a baja presión.* Universidad Michocana de San Nicolás Hidalgo.
- Casanova, K. J., Fonseca, G. N., & Agudo, F. D. (2018). Análisis de la combustión híbrida de metano y butanol en un motor de combustión interna. *Revista de La Asociación Española de Ingeniería Mecánica.*
- Castellanos-Sánchez, J. E., Aguilar-Aguilar, F. A., Hernández-Altamirano, R., Venegas Venegas, J. A., & Raj Aryal, D. (2023). Biogas purification processes: review and prospects. *Biofuels*. <https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2223801>
- CEIEG. (2021). *Perfiles municipales.* Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas. <https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/perfiles/Inicio>
- Cerrón, S. V., & Matos, C. (2013). *Removal of hydrogen sulphide (h₂s) contained in the biogas , generated by an anaerobic reactor.*
- Cheng-Chang, L., Jeng-Lian, L., & Ching-Hua, T. (2014). Water Scrubbing for Removal of Hydrogen Sulfide (H₂S) Inbiogas from Hog Farms. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 03(02), 1–6. <https://doi.org/10.4236/jacen.2014.32b001>
- Chuanhai, A., & Ramaraj, R. (2018). Sustainability assessment of biogas production from buffalo grass and dung: biogas purification and bio-fertilizer. *3 Biotech*, 8(3), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1170-x>
- Converti, A., Oliveira, R. P. S., Torres, B. R., Lodi, A., & Zilli, M. (2009). Biogas production and valorization by means of a two-step biological process. *Bioresource Technology*, 100(23), 5771–5776. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2009.05.072>
- Cornejo, A. P. M. de L. (2022). *Aplicaciones del metano.* 3–5.

- Couvert, A., Sanchez, C., Laplanche, A., Renner, C., & Levasseur, J. P. (2008). Design of a new compact scrubber for deodorisation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(9–10), 1793–1798. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2007.10.006>
- Dotres, Z. S., Garciandía, M. G., & Zúñiga, I. L. M. (2020). El costo total de inversiones en proyectos de construcción. *RILCO DS: Revista de Desarrollo Sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación*, ISSN-e 2695-6098, Vol. 2, Nº. 11 (Septiembre), 2020, 2(11), 2. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7864528&info=resumen&idioma=SPA>
- Durán, I., Rubiera, F., & Pevida, C. (2022). Modeling a biogas upgrading PSA unit with a sustainable activated carbon derived from pine sawdust. Sensitivity analysis on the adsorption of CO₂ and CH₄ mixtures. *Chemical Engineering Journal*, 428. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132564>
- Elizondo, A., & Herrera, E. (2012). *Evaluación de medios filtrantes para la reducción del sulfuro de hidrógeno en el mejoramiento de la calidad del biogás*. Evaluación de medios filtrantes para la reducción del sulfuro de hidrógeno en el mejoramiento de la calidad del biogás. 19.
- Ely, C., Williams, R., Martynowicz, T., & Kosusko, M. (2016). Evaluating biogas management technologies. *BioCycle*, 57(9), 38–42.
- FAO. (2011). Manual del Biogás. *Proyecto CHI/00/G32*, 120. <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- FAO. (2020). *Factibilidad de la incorporación de biometano en la red de gas natural troncal y en las redes de distribución en localidades aisladas*. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/ca8756es>
- Fernández-Delgado, J. M., Mostbauer, P., Knapp, A., Müller, W., Tertsch, S., Bockreis, A., & Insam, H. (2018). Biogas purification with biomass ash. *Waste Management*, 71, 224–232. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2017.09.043>
- Friedrich, C. G., Rother, D., Bardischewsky, F., Ouentmeier, A., & Fischer, J. (2001).

- Oxidation of reduced inorganic sulfur compounds by bacteria: emergence of a common mechanism? *Applied and Environmental Microbiology*, 67(7), 2873–2882. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.7.2873-2882.2001>
- Gantina, T. M., Iriani, P., Maridjo, & Wachjoe, C. K. (2020). Biogas purification using water scrubber with variations of water flow rate and biogas pressure. *Journal of Physics: Conference Series*, 1450(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1450/1/012011>
- Ghatak, M. Das, & Mahanta, P. (2016). Biogas purification using chemical absorption. *International Journal of Engineering and Technology*, 8(3), 1600–1605.
- Gómez, B. C. (2014). *Desarrollo De Un Sistema Para Acondicionar Y Presurizar Biogás*.
- Gonçalves, A., Puna, J. F., Guerra, L., Rodrigues, J. C., Gomes, J. F., Santos, M. T., & Alves, D. (2019). Towards the development of syngas/biomethane electrolytic production, using liquefied biomass and heterogeneous catalyst. *Energies*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/en12193787>
- González, H. A. (2017). *Estudio del empleo de metano como combustible de sustitución en hibridación de motores diesel*.
- Guo, P., Zhang, Y., & Zhao, Y. (2018). Biocapture of CO₂ by Different Microalgal-Based Technologies for Biogas Upgrading and Simultaneous Biogas Slurry Purification under Various Light Intensities and Photoperiods. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2018, Vol. 15, Page 528, 15(3), 528. <https://doi.org/10.3390/IJERPH15030528>
- Heredia, A. S. (2011). Experiencias sobre corrosión en metales de uso cotidiano. *Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 8, 466–475.
- Ibrahim, R., El Hassni, A., Navaee-Ardeh, S., & Cabana, H. (2022). Biological elimination of a high concentration of hydrogen sulfide from landfill biogas. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 431–443. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-15525-7/METRICS>
- Ibrahim, R., Navaee-Ardeh, S., & Cabana, H. (2022). Biogas purification by a chemical

absorption and biological oxidation process. *Water, Air, and Soil Pollution*, 233(3), 1–14. <https://doi.org/10.1007/S11270-022-05559-Z/METRICS>

Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero | Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático | Gobierno | gob.mx. (n.d.). Retrieved March 12, 2022, from <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>

Iovane, P., Nanna, F., Ding, Y., Bikson, B., & Molino, A. (2014). Experimental test with polymeric membrane for the biogas purification from CO₂ and H₂S. *Fuel*, 135, 352–358. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.060>

Islamiyah, M., Soehartanto, T., Hantoro, R., & Abdurrahman, A. (2015). Water Scrubbing for Removal of CO₂ (Carbon Dioxide) and H₂S (Hydrogen Sulfide) in Biogas from Manure. *KnE Energy*, 2(2), 126. <https://doi.org/10.18502/ken.v2i2.367>

Kapoor, R., Ghosh, P., Kumar, M., & Vijay, V. K. (2019). Evaluation of biogas upgrading technologies and future perspectives: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 2019 26:12, 26(12), 11631–11661. <https://doi.org/10.1007/S11356-019-04767-1>

Karne, H., Mahajan, U., Ketkar, U., Kohade, A., Khadilkar, P., & Mishra, A. (2022). A review on biogas upgradation systems. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.015>

Kasulla, S., Malik, S. J., Zafar, S., & Saraf, A. (2021). A Retrospection of Hydrogen Sulphide Removal Technologies in Biogas Purification. *Published in International Journal of Trend in Scientific Research and Development (Ijtsrd)*, 5(3), 857–863. <https://www.academia.edu/download/66292738/ijtsrd39996.pdf>

Kismurtono, M., K.W, S., M, R., & A. R, D. W. (2015). Development of a New Phase Change Biogas for Renewable Energy Storage System. *KnE Energy*, 1(1), 115. <https://doi.org/10.18502/KEN.V1I1.342>

Kuo-Ling, H., Wei-Chih, L., Ying-Chien, C., Yu-Pei, C., & Ching-Ping, T. (2013). Elimination of high concentration hydrogen sulfide and biogas purification by

chemical-biological process. *Chemosphere*, 92(10), 1396–1401.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.05.054>

Kwaśny, J., & Balcerzak, W. (2016). Sorbents used for biogas desulfurization in the adsorption process. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(1), 37–43.
<https://doi.org/10.15244/pjoes/60259>

Laguillo Revuelta, S., & Saúl. (2015). *Análisis de mecanismos de reacción química para la combustión del metano*. <http://hdl.handle.net/10902/7524>

Läntelä, J., Rasi, S., Lehtinen, J., & Rintala, J. (2012). Landfill gas upgrading with pilot-scale water scrubber: Performance assessment with absorption water recycling. *Applied Energy*, 92, 307–314. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.10.011>

Leitón, J. (2014). *Purificación de biogás utilizando agua a presión óxido de calcio y carbón Biogas*. 25(1), 65–72.

Llaneza, H., Morís, M. A., González Azpíroz, L., & González, E. (2010). Caracterización, purificación y control de biogás. *Estudio de Viabilidad de Sistemas de Purificación y Aprovechamiento de Biogás*, 1–29.

Mahmoodi-Eshkaftaki, M., & Houshyar, E. (2020). Biogas recirculation technology: Effect on biogas purification, slurry characteristics, microbial activity and energy consumption. *Environmental Technology and Innovation*, 19, 100867.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100867>

Maile, O. I., Muzenda, E., & Tesfagiorgis, H. (2017a). Chemical Absorption of Carbon Dioxide in Biogas Purification. *Procedia Manufacturing*, 7, 639–646.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.095>

Maile, O. I., Muzenda, E., & Tesfagiorgis, H. (2017b). Chemical Absorption of Carbon Dioxide in Biogas Purification. *Procedia Manufacturing*, 7, 639–646.
<https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2016.12.095>

Maile, O. I., Tesfagiorgis, H., & Muzenda, E. (2017). The potency of monoethanolamine in biogas purification and upgrading. *South African Journal of Chemical Engineering*, 24, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.06.004>

- Makareviciene, V., & Sendzikiene, E. (2015). Technological assumptions for biogas purification. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 36(14), 1745–1750. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1008585>
- Manrique, M. J. L., Medina Carpio, O. C., Manrique Pino, P. L., Macedo Benavente, E. P., & Tupayachy Quispe, D. P. (2020). Evaluación de la capacidad desulfurante de la cascarilla de *Oryza sativa* transformada como material poroso activado con potencial uso en el tratamiento de biogás. *Veritas*, 21(2), 67. <https://doi.org/10.35286/veritas.v21i2.281>
- Mendoza, A. J. A. (2015). *Metodología óptima para remoción de sulfuro de hidrógeno (H₂S) del biogás producido en la Región Arequipa*. 19–22.
- Miyawaki, B., Mariano, A. B., Vargas, J. V. C., Balmant, W., Defrancheschi, A. C., Corrêa, D. O., Santos, B., Selesu, N. F. H., Ordonez, J. C., & Kava, V. M. (2021). Microalgae derived biomass and bioenergy production enhancement through biogas purification and wastewater treatment. *Renewable Energy*, 163, 1153–1165. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.045>
- Mojica, C., Vidal, E., Rueda, B., & Acosta, D. (2016). Estudio de las características físico-químicas de residuos orgánicos para su uso potencial en la producción de biogás. *Artículo Revista de Energía Química y Física Marzo*, 3(6), 15–22. http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia_Quimica_y_Fisica/vol3num6/Revista_Energia_Quimica_Fisica_V3_N6_3.pdf
- Mójica, M. C., Vidal, B. E., Zavala, B. A., & Torres, L. D. (2017). *Diseño y construcción de un sistema físico de purificación de biogás*. 3(2), 52–63.
- Mollah, A. S., Sattar, S., Hossain, M. A., Salahuddin, A. Z. M., & Rashid, H. A.-. (2015). Prospects of Nuclear Energy for Sustainable Energy Development in Bangladesh. *International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering*, 5(0), 28. <https://doi.org/10.14355/IJNESE.2015.05.004>
- Morero, B. (2014). Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias. *Instituto de Desarrollo Tecnológico Para La Industria Química, PhD.*, 248.
- Morgado, F., López, L., & Pedraza, J. (2020). Revisión sobre las principales

- tecnologías para la purificación de biogás. Situación actual en Cuba. *Márgenes*, 8(3), 119–139. <https://revistas.uniss.edu.cu/index.php/margenes/article/view/1094>
- Moron, E. (2018). *Hibridación de orbitales atómicos*. Steemit. <https://steemit.com/spanish/@emiliomoron/hibridacindeorbitalesatmicos-rkqih4zqhn>
- Moya, C., Santiago, R., Hospital-Benito, D., Lemus, J., & Palomar, J. (2022). Design of biogas upgrading processes based on ionic liquids. *Chemical Engineering Journal*, 428. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132103>
- Muñoz, R., Meier, L., Diaz, I., & Jeison, D. (2015). A review on the state-of-the-art of physical / chemical and biological technologies for biogas upgrading. *Rev. Environ Sci Biotechnol, Rasi 2009*, 33. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9379-1>
- Nie, H., Jiang, H., Chong, D., Wu, Q., Xu, C., & Zhou, H. (2013). Comparison of water scrubbing and propylene carbonate absorption for biogas upgrading process. *Energy and Fuels*, 27(6), 3239–3245. <https://doi.org/10.1021/ef400233w>
- Noor, M. M., Wandel, A. P., & Yusaf, T. F. (2014). *The development of mild combustion open burner experimental setup*. https://www.researchgate.net/publication/236985748_the_development_of_mild_combustion_open_burner_experimental_setup
- Ofori-Boateng, C., & Kwofie, E. M. (2009). Water Scrubbing: A Better Option for Biogas Purification for Effective Storage. *World Applied Sciences Journal Environmental Management and Technologies Towards Sustainable Development*, 5(January 2009), 122–125.
- Ortega, V. L., Rodríguez Muñoz, S., Fernández Santana, E., & Bárcenas Pérez, L. (2015). *Principales métodos para la desulfuración del biogás*. XXXVI(1), 45–56.
- Panduro-Pisco, G., Díaz Zúñiga, E. J., Herrera Challco, S. J., & Noriega Silva, R. E. A. (2020). Purificación de biogás procedente de lodos de palma aceitera con monoetanolamina (MEA) y Ácido acético (ÁAC). *Ciencia Amazónica (Iquitos)*, 8(1), 17–30. <https://doi.org/10.22386/ca.v8i1.278>

- Peña, D. G., & Dávila-del-Carpio, G. (2020). Purificación del Biogás para la producción de Biometano, a través de sistemas de filtración de CO₂ y vapor de agua. *Veritas*, 21(2), 45. <https://doi.org/10.35286/veritas.v21i2.277>
- Piechota, G. (2021). Multi-step biogas quality improving by adsorptive packed column system as application to biomethane upgrading. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105944. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105944>
- Plączek, M., Patyna, A., & Witczak, S. (2017). Technical evaluation of photobioreactors for microalgae cultivation. *E3S Web of Conferences*, 19. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/20171902032>
- Quesada, R., Salas, N., Arguedas, M., & Botero, R. (2007). *Generación de energía eléctrica a partir de biogás*.
- Ray, N. H. S., Mohanty, M. K., & Mohanty, R. C. (2015). Water Scrubbing of Biogas Produced from Kitchen Wastes for Enrichment and Bottling in LPG Cylinder for Cooking Applications. *IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 2 Issue 5, May 2015. *Www.ijiset.Com*, 2(5), 45–53.
- Ray, N. H. S., Mohanty, M. K., & Mohanty, R. C. (2016). Biogas compression and storage system for cooking applications in rural households. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6(2), 594–598. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v6i2.3449.g6823>
- Reyes, A. E. A. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 24, 60–81. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i24.5552>
- Rojas, L. M. D., Valencia, C. M. E., & Cuartas, P. D. (2017). Optimización racional de costos Rational cost optimization. *Pág*, 38, 39.
- Rosa, M. De. (2020). *Economic assessment of producing and selling biomethane into a regional market*. <https://doi.org/10.1177/0958305X18762581>
- Ryckebosch, E., Drouillon, M., & Vervaeren, H. (2011). Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1633–1645.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.033>

- Sagarnaga, V. L. M., Salas, G. J. M., & Aguilar, A. J. (2014). *Ingresos y costos de producción* (CIESTAAM: México (Ed.); 1ª Edición).
- Sahu, K. A., Kalbande, S. R., & Khambalkar, V. P. (2020). *Development of Low Cost Biogas Purification System*. *9*(4), 791–796.
- Salafudin, Setyobudi, R. H., Wahono, S. K., Nindita, A., Adinurani, P. G., Nugroho, Y. A., Sasmito, A., & Liwang, T. (2015). Biological Purification System: Integrated Biogas from Small Anaerobic Digestion and Natural Microalgae. *Procedia Chemistry*, *14*, 387–393. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.03.069>
- Saunders, V. A. (2018). *Usos del Biogás. December 2018*.
- Scarlat, N., Dallemand, J. F., & Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, *129*, 457–472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>
- Severiche Sierra, C. A., & Acevedo Barrios, R. L. (2013). Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación. *Ingenium Revista de La Facultad de Ingeniería*, *14*(28), 6. <https://doi.org/10.21500/01247492.1330>
- Spalding, M. H. (2008). Microalgal carbon-dioxide-concentrating mechanisms: Chlamydomonas inorganic carbon transporters. *Journal of Experimental Botany*, *59*(7), 1463–1473. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERM128>
- Srichat, A., Suntivarakorn, R., & Kamwilaisak, K. (2017). A Development of Biogas Purification System Using Calcium Hydroxide and Amine Solution. *Energy Procedia*, *138*, 441–445. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.196>
- Srichat, A., Suntivarakorn, R., Kamwilaisak, K., Ghatak, M. Das, Mahanta, P., Issah, A. A., Kabera, T., Kemausuor, F., Fernández-Delgado Juárez, M., Mostbauer, P., Knapp, A., Müller, W., Tertsch, S., Bockreis, A., Insam, H., Mahmoodi-Eshkaftaki, M., Houshyar, E., Tippayawong, N., Thanompongchart, P., ... Tesfagiorgis, H. (2020). Sorbents used for biogas desulfurization in the adsorption process. *Biomass and Bioenergy*, *19*(3), 163–173.

<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.05.002>

Sriharti, & Hidayat, D. D. (2020). *Quality Improvement of Biogas Fuel through the Adsorption Method.*

<https://web.s.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=19061714&AN=144575249&h=Hw%2FJSKZBx9%2Ftg5BtH DHobywC29xN3cNAMDFh4yZFUUv6SVVig5L7AvbAsDnYngV7OMmsnebM%2BHXVxnvdjMDinQ%3D%3D&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLo>

Struk, M., Kushkevych, I., & Vítězová, M. (2020). Biogas upgrading methods: recent advancements and emerging technologies. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 19(3), 651–671. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09539-9>

Sun, Q., Li, H., Yan, J., Liu, L., Yu, Z., & Yu, X. (2015). Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 521–532. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.06.029>

Tippayawong, N., & Thanompongchart, P. (2010). Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. *Energy*, 35(12), 4531–4535. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.014>

Tobares, L. (2013). La importancia y el futuro del biogás en la Argentina. *Petrotecnia*, 68–74.

Torres-Calderón, S., Paucar-Palomino, M., & Pampa-Qispe, N. (2020). Adsorption of hydrogen sulfide from biogas through pretreated iron shavings for energy reuse. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 1(1), 18–29.

Valencia, L. V., Acosta, J. M., Díaz, I. R., & Gálvez, R. L. (2015). *Diseño, construcción y evaluación de un sistema de purificación y compresión para biogás*. 9(2), 59–66.

Varnero, M. T., Carú, M., Galleguillos, K., & Achondo, P. (2012). Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación eléctrica. *Informacion Tecnologica*, 23(2), 31–40. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000200005>

Vazquez, V. L. A. (2016). *Sistema Integral de Generación de energía eléctrica por*

medio de biogás.

- Vega, D., Freire, M., Torres, T., Llumiyinga, K., & Jácome, C. (2022). Biodigestion: self-sustaining process to obtain renewable energy. *Journal of Agro-Industry Sciences*, 4(1), 29–36. <https://doi.org/10.17268/jais.2022.004>
- Vijay, V. K. (2007). Biogas refining for production of bio-methane and its bottling for automotive applications and holistic development. *Proc. of International Symposium on Eco Topia ...*, 07, 35–40. <http://www.esi.nagoya-u.ac.jp/h/isets07/Contents/Session05/1018Vijay.pdf>
- Vijay, V. K., Chandra, R., Subbarao, P. M. V., & SKapdi, hyam S. (2006). *Biogas purification and bottling into CNG cylinders: producing bio CNG from biomass for rural automotive applications*". Mechanical Engineering department, Indian Institute of Technology.
- Vitores, J. (2015). *La cinética de la combustión de metano*. 99. <http://hdl.handle.net/10016/23208>
- Wei-Chih, L., Yu-Pei, C., & Ching-Ping, T. (2013). Pilot-scale chemical–biological system for efficient H₂S removal from biogas. *Bioresource Technology*, 135, 283–291. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.10.040>
- World Nuclear Association. (2018). *Heat values of various fuels*. <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>
- Xu, M., Xue, Z., Sun, S., Zhao, C., Liu, J., Liu, J., & Zhao, Y. (2020). Co-culturing microalgae with endophytic bacteria increases nutrient removal efficiency for biogas purification. *Bioresource Technology*, 314(July), 123766. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123766>
- Zdeb, M. (2013). An Efficiency of H₂S Removal from Biogas via Physicochemical and Biological Methods-a Case Study. *Annual Set The Environment Protection Rocznik Ochrona Środowiska*, 15.
- Zeballos, R. H. J. (2018). Diseño, Construcción y ensayo básico de equipo de purificación utilizando Scrubber para mejorar el biogás reduciendo su contenido

de dióxido de carbono en el Distrito de Majes-Arequipa. In *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú Facultad de Ingeniería de Producción y Servicios. Escuela Profesionas de Ingeniería Mecánica.*
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10883><http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/4057><http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8014><http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6899>