

Artículo científico.

Evaluación experimental de métodos de purificación de biogás producido a partir de estiércol de cerdo en biodigestores rurales

Experimental evaluation of purification methods for biogas produced from pig manure in rural biodigesters

 Salazar Del Pozo Luis Fernando¹  Apaza Rojas Carla².
 Hamel Fonseca Jaime³  Sandoval Rojas Ariel⁴

1. Ing. Petróleo, Gas y Energías. Univalle. Cochabamba. Bolivia. sdl0023992@est.univalle.edu
2. Ing. Química. Univalle. Cochabamba. Bolivia. capazar@univalle.edu
3. Lic. Química. Univalle. Cochabamba. Bolivia. jhamelf@univalle.edu
4. Ing. Petróleo, Gas y Energías. Univalle. Cochabamba. Bolivia. asandovalr@univalle.edu

RESUMEN

El biogás es una mezcla de gases, de los cuales el metano es de mayor interés, no obstante, este contiene otros gases contaminantes derivados del proceso de biodigestión anaerobia. Estos contaminantes gaseosos pueden generar corrosión en los equipos que usen biogás como combustible, por lo que la búsqueda de tecnologías alternativas para reducir el contenido de estos o eliminarlos por completo es de gran interés para promover el uso de esta fuente de energía renovable. Los métodos usados en procesos químicos y físicos generan desechos contaminantes que deben ser adecuadamente manejados. Por otra parte, la remoción de CO₂ requiere de equipos con costos altos de adquisición y operación, limitándolos a niveles industriales de producción. Esta situación dificulta el uso del biogás en pequeñas instalaciones rurales por la falta de infraestructura adecuada.

El carbón activado es empleado en la industria por su efectividad en la remoción de diferentes gases contaminantes, pero a niveles de producción doméstico es poco accesible debido a su alto costo. A pesar de la generación de desechos sólidos, la absorción de sulfuro de hidrógeno con lana de hierro es el método comúnmente utilizado en instalaciones pequeñas por su accesibilidad y bajo costo. El sulfato de cobre comercial en solución acuosa es una alternativa efectiva y accesible para la remoción de sulfuro de hidrógeno.

Palabras clave: Biogás. Purificación de biogás. Sulfuro de hidrógeno. Dióxido de carbono. Contaminantes de Biogás.

ABSTRACT

Biogas contains a mixture of gases, of which methane is of the most interest, the rest of the contaminant gases are the product of the activity of microorganisms involved in the anaerobic digestion process. These contaminants limit the use of biogas as a fuel, especially in the generation of electrical energy. The search for alternative technologies for the treatment of biogas is of great interest to

Citar como: Salazar Del Pozo, L. F., Apaza Rojas, C., Sandoval Rojas, A., & Hamel Fonseca, J. (2023). Evaluación experimental de métodos de purificación de biogás producido a partir de estiércol de cerdo en biodigestores rurales: Experimental evaluation of purification methods for biogas produced from pig manure in rural biodigesters. *Journal Boliviano De Ciencias*, 19(Especial), 171-187 <https://doi.org/10.52428/20758944.v19iEspecial.947>

Revisado: 01/02/2023

Aceptado: 29/06/2023

Publicado: 30/06/23

Declaración: Derechos de autor 2023 Salazar Del Pozo, L. F., Apaza Rojas, C., Sandoval Rojas, A., & Hamel Fonseca, J. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



promote the use of this renewable energy source. Biogas purification methods make use of chemical and physical processes that generate polluting waste, which must be effectively managed, and the removal of CO₂ often requires specialized equipment, limiting this process to industrial scale productions. Activated carbon is effective in removing contaminants but is inaccessible to rural farms due to its cost. Iron sponge is often used in domestic facilities due to the low cost and ease of access, nonetheless this method generates solid wastes that are difficult to dispose of. Commercial copper sulfate can remove hydrogen sulfate but requires adequate pressure conditions to be effective.

Keywords: Biogas. Biogas treatment. Hydrogen sulfide. Carbon dioxide. Biogas contaminants.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, apenas un 18% del consumo energético global proviene de fuentes de energía renovables como hidroeléctrica, solar y biomasa (WBA, 2020). En Bolivia, el consumo de energías primarias conforma un 92.6% de combustibles fósiles, principalmente gas natural, un 1.5% de la demanda es cubierta por energía hidroeléctrica y 5.71% por biomasa (MHE, 2021). Aproximadamente 85% del suministro de energía a partir de biomasa proviene de fuentes sólidas como pellets de madera, residuos forestales y agrícolas, el 7% es cubierto por biocombustibles líquidos, el 5% por desechos industriales y 3% por biogás (WBA, 2020).

La biomasa es el uso de materia orgánica de origen vegetal, para la obtención de energía como en el biogás (Varnero, Caru, Galleguillos, & Achondo, 2012); a partir de la degradación de materia orgánica por acción de microorganismos y está compuesto mayoritariamente de metano (CH₄) (55% y 70%), dióxido de carbono (CO₂) (30-45%) y sulfuro de hidrógeno (H₂S) (1-3%) (Ortega, Bárcenas, Fernández, & Rodríguez, 2015). Ya que el biogás es producido a partir de materia orgánica, es una fuente de energía renovable con alto potencial para reemplazar a los combustibles no renovables convencionales en países en vías de desarrollo (Hassan, Maher, Janna, Kholoud, & Eldon, 2020).

De todos los componentes del biogás, el metano es el único componente significativo que es convertido en energía durante el proceso de combustión, tiene una capacidad calorífica considerable (9.97 kW/m³). Por el contrario, el dióxido de carbono no es combustible (Ponce, 2016), por consiguiente, la capacidad calorífica del biogás está determinada principalmente por el porcentaje de metano presente (Morero, Gropelli, & Campanella, 2010). Dado que el dióxido de carbono se encuentra frecuentemente y en altas concentraciones, su contenido afecta directamente al poder calorífico del biogás y debe ser eliminado (Marín De Jesus, 2021). Así también, la presencia del sulfuro de hidrógeno disminuye la vida útil de los equipos que intervienen en la producción, transferencia y suministro de energía eléctrica (Tornero & Ramírez, 2015). Por lo tanto, la remoción del sulfuro de hidrógeno del biogás también resulta ser de gran importancia para su uso en la generación de energía. (Hassan *et al.*, 2020).

A pesar de diversos esfuerzos por parte de organizaciones internacionales por promover el uso de biodigestores en el área rural de Bolivia, estos proyectos fueron rápidamente abandonados porque no se proporcionó el entrenamiento adecuado

para su operación (Garfí, 2016). Actualmente algunas granjas de cerdo pequeñas utilizan biodigestores principalmente para el manejo de sus desechos y uso energético doméstico, estas instalaciones suelen encontrarse en lugares alejados y no cuentan con la infraestructura ni recursos económicos para operar a escalas industriales (Rivero, 2009).

En los últimos años, la búsqueda de tecnologías de remoción de contaminantes del biogás dio como resultado varios procesos de mejora basados en tecnologías físicas/químicas capaces de proporcionar purezas de metano de 88% a 98%. No obstante, el consumo de energía e insumos limita la sostenibilidad ambiental y económica de las tecnologías de mejoramiento de biogás convencionales (Figueroa *et al.*, 2019). Por tanto, la presente investigación pretende evaluar la tecnología de purificación y adecuación de biogás, mediante la evaluación local de distintos materiales como polvo de hierro, lana de hierro, hidróxido de sodio, zeolita, sílica gel, acetato de plomo y sulfato de cobre, en el biodigestor de la Unidad Experimental de Producción de Biogás (UEPB) de la Universidad Privada del Valle en su Campus Tiquipaya, para optimizar el sistema de filtración, reducir los desechos contaminantes generados y permitir un funcionamiento continuo óptimo para la generación de energía eléctrica.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Carbón activado (Clarimex) granulometría malla 8x30 de 1,5 a 2,5 mm, zeolita clinoptilolita, sulfato de cobre (CuSO_4) grado analítico, sulfato de cobre al 96,7%, hidróxido de sodio (NaOH) al 87,5%, perlas de sílica gel azul, lana de hierro, hierro en polvo, acetato de plomo p.a., insumos de plomería en general.

2.2 Metodología

El proyecto de investigación tomo como base los resultados de un historio y monitoreo anual de producción de biogás del la Unidad Experimental de Producción de Biogás (UEPB) de la Universidad Privada del Valle, Campus Tiquipaya.

2.2.1 Descripción de la materia prima e insumos para la producción de biogás

La materia prima se recolectó de la granja Escobar, ubicada en el municipio de Tiquipaya, perteneciente al departamento de Cochabamba – Bolivia. con una humedad cercana al 40% como se puede observar en la Tabla 1, la cual ingresó al biodigestor mezclado con agua de pozo, en una relación 3:1. Para todos los lotes de producción se realizaron cargas de 1 m³ de estiércol. De acuerdo con el análisis del pH de estiércol de cerdo se obtuvo como resultado el valor promedio de pH=6, este es ligeramente ácido y puede variar en función de distintos factores como la dieta del animal, edad y el manejo de las granjas como lo mencionan Romat, Fernandez, Iorio y Bargiela (2021).

La medición del pH del estiércol mezclado con agua que ingresó al biodigestor dio como resultado un valor de 6,0, es decir que el interior del biodigestor se encuentra cerca de los valores ideales para la producción de metano óptimos para la metanogénesis (Nuntón, 2018).

Tabla 1. Resultados del análisis del estiércol de cerdo

Parámetros	Unidad	Resultado
pH	Adimensional	6,0
Nitrógeno Kjeldahl	%	0,63
Materia Orgánica	%	31,1
Cenizas	%	4,40
Humedad	%	39,97

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Los resultados encontrados para el valor de nitrógeno Kjeldahl (NKj) son mayores a los valores reportados en otras publicaciones mencionadas anteriormente (Romat *et al.*, 2021).

Tabla 2. Resultados del análisis del agua

Parámetros	Unidad	Resultado	Norma Boliviana NB 512
pH	Adimensional	6,75	6,5 – 9,0
Conductividad	μS/cm	241	1500 μS/cm
Cloro Residual	mg/l	<0.1	0,2 – 1,0 mg/l
Manganeso	mg/l	<0.002	0,1 mg/l
Alcalinidad	mg/l	134	370,0 mg/l
Dureza Total	mg/l	104	500 mg/l
Hierro Total	mg/l	<0.005	0,3 mg/l

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Los resultados del análisis del agua (Tabla 2) muestran un pH=6,75 el cual es prácticamente neutro, así mismo se observan valores de alcalinidad y dureza bajos, por lo que no tendrá un efecto negativo en la producción de biogás al mezclarse con el estiércol de cerdo.

2.2.2 Seguimiento a la producción de biogás

En la Tabla 3 se muestran los resultados del seguimiento de la producción de biogás en la Unidad Experimental de Producción de Biogás (UEPB) de la Universidad Privada del Valle. Se puede notar que los lotes iniciales de cada cronograma de producción (L-2101 y L-2201) tienden a tener una producción baja. Los lotes L-2101 hasta L-2107 se realizaron de forma discontinua y los lotes L-2201 a L-2204 en régimen semicontinuo. Ambos cronogramas se iniciaron tras un periodo de tiempo de varios meses desde la última carga.

Tabla 3. Producción de Biogás

Lote	Tiempo de retención (días)	Volumen producido (m ³)
L-2101	22	6.700
L-2102	37	85.016
L-2103	23	69.041
L-2104	25	87.380
L-2105	10	63.616
L-2106	16	42.094
L-2107	10	41.977
L-2201	11	28.305
L-2202	13	57.140
L-2203	13	63.518
L-2204	13	83.936

Fuente: Elaboración propia. 2022.

Se determinó un promedio de producción de aproximadamente 66 m³ con una proyección de hasta 100 m³ medidos a temperaturas promedio de 28 °C y presión atmosférica para una producción semicontinua a lo largo del año.

2.2.3 Determinación del contenido de H₂S en el biogás

Para determinar el contenido inicial de sulfuro de hidrógeno del biodigestor, se utilizó un muestreador de gases de vidrio de 800 ml adaptadas con llaves teflón en ambos extremos, el mismo se llenó completamente de biogás, se inyectó una solución de sulfato de Cobre, el contenido fue filtrado y recolectado en un papel y secado por 1 hora a 120 °C.

Para realizar la medición del biogás tras los filtros de prueba se adaptaron puntos de muestreo antes y después de cada uno en la línea; se dejó pasar el biogás por estos y en la toma de muestra ubicada a la salida se colocó el sensor de medición de H₂S del equipo ToxiRAE Pro PGM-1860.

También se utilizaron tiras de papel humedecido en acetato de plomo de acuerdo con lo establecido en la norma NTE INEN 679, las cuales ayudaron a la toma de mediciones rápidas permitiendo la detección de sulfuro de hidrógeno en el biogás de forma cualitativa en diferentes puntos de la línea de gas y detectar también posibles fugas. Se colocaron las caras humedecidas de estas contra las boquillas de muestreo de la línea y se abrieron estas durante 10 a 15 segundos, tras cerrar las válvulas se observó si existieron o no cambios en la coloración de la tira, donde un color marrón oscuro significa que existe H₂S en el biogás.

2.2.4 Determinación del contenido de CO₂ en el biogás

Para la determinación del contenido de dióxido de carbono tanto antes como después de los filtros, se utilizó un equipo medidor de gases portátil Kane. Se introdujo la boquilla del equipo en el punto de toma de muestras de la UEPB y se dejó salir el gas, se esperó a que el gas reemplace todo el aire en la toma de muestra y se tomaron los valores en la pantalla del equipo después de estabilizarse.

2.2.5 Determinación de la humedad relativa del biogás

La humedad relativa se determinó utilizando un termo-higrómetro digital PCE-555, cuyo sensor se acercó a la toma de muestra de la unidad se dejó salir biogás y anotó el resultado observado en la pantalla del equipo.

2.2.6 Determinación de la presión manométrica

La presión fue medida utilizando un manómetro en “u”, a la entrada y salida de los diferentes filtros que fueron evaluados. Se determinó la presión en milibares por cada cm de cambio en la altura del líquido en el equipo.

2.2.7 Evaluación del material filtrante

De acuerdo a los datos de producción y características del biogás producido (Tabla 4) en la Unidad Experimental de Producción de Biogás (UEPB) de Univalle, se seleccionaron varios materiales para ser puestos a prueba a diferentes escalas, estos fueron: polvo de hierro, lana de hierro, hidróxido de sodio comercial (Soda Caustica), zeolita, carbón activado, sílica gel, acetato de plomo y sulfato de cobre. Inicialmente se utilizaron vasos de burbujeo para poner a prueba soluciones de hidróxido de sodio, acetato de plomo y sulfato de cobre. Se realizaron pruebas para evaluar las siguientes variables: capacidad de remoción de sulfuro de hidrógeno, capacidad de remoción de dióxido de carbono y caída de presión manométrica del gas al pasar por el filtro.

Se construyeron prototipos de prueba utilizando material de plomería en PVC. Para la evaluación de cada filtro se instalaron también tomas de muestra antes y después de cada uno en la línea de gas de la unidad.

2.2.7.1 Filtro de Polvo de Hierro

Para la evaluación de este material, se humedeció polvo de hierro con agua potable proveniente de la red local y se dejó oxidar por 2 días hasta que se observó la formación de óxido, este se colocó en la parte inferior de un burbujeador y se agregó agua. Se utilizó tela para evitar que el polvo pueda salir por alguna de las boquillas del filtro. Se hizo burbujear el biogás en el óxido colocando una manguera entre la boquilla del vaso y una toma de muestra.

2.2.7.2 Filtro de Lana de Hierro

Para la prueba inicial, se colocó la lana de hierro en un recipiente cerrado con agua, y se dejó burbujear el biogás durante 2 días. Posteriormente se construyeron 2 filtros cilíndricos de 1 m de largo interconectados en forma de “u” utilizando tubería PVC de 4” los cuales se rellenaron con un total de 1,5 kg de lana de hierro humedecida y se instalaron en la línea de gas de la UEPB.

2.2.7.3 Filtro de Hidróxido de Sodio

Este filtro de prueba se construyó utilizando tubería PVC de 4" de 0,8 m de longitud sellado en ambos extremos. El biogás ingresó por una tubería vertical de ¾" conectada a otra horizontal de ½" perforada en el interior del tubo, esto permitió el burbujeo del gas en una solución saturada de hidróxido de sodio comercial y agua. El gas purificado es extraído por la parte superior del filtro donde se instalaron tomas de muestra.

2.2.7.4 Filtro de Zeolita

Se utilizó zeolita clinoptilolita, la cual fue térmicamente tratada en un horno de calcinación a una temperatura de 450 °C con el fin de eliminar la materia orgánica presente del interior de sus poros y así incrementar la superficie de contacto del material. Se fabricó un filtro de prueba con tubería de PVC de 4". El ingreso y salida del biogás se hizo mediante tuberías de ¾" en ambos extremos del filtro, se rellenó el interior de la tubería con zeolita sujeta por anillos de PVC cubiertos de malla milimétrica, que sirvió para compactar el material y evitar su deformación.

2.2.7.5 Filtro de Carbón Activado

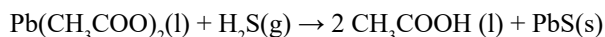
Se fabricaron dos filtros y se unió estos mediante una tubería en sus extremos. Cada filtro de carbón activado se fabricó con 2 tuberías de PVC de 4" de 1 m de longitud selladas con tapas del mismo material, estas se rellenaron con 3,5 kilogramos carbón activado. Los filtros se instalaron en serie con un recorrido en forma de "u". La toma de muestra se realizó antes y después de ambos filtros.

2.2.7.6 Filtro de Sílica Gel

El filtro de sílica gel se construyó con tubería PVC de 3" de 0.5 m de longitud cerrada en ambos extremos, se rellenó con sílica gel soportada por anillos de PVC y malla milimétrica con tomas de muestra antes y después del filtro.

2.2.7.7 Filtro de Acetato de Plomo

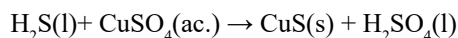
El acetato de plomo ($\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) reacciona con el sulfuro de hidrógeno para formar un precipitado sólido poco soluble en agua (K_{ps} de 3×10^{-28}) (Skoog & West, 2015), como se muestra en la reacción siguiente:



Para la evaluación de este material en el tratamiento de biogás, se preparó una solución de acetato de plomo y agua, y se hizo burbujear en un vaso una corriente de biogás en esta solución conectando el extremo de la tubería del vaso de burbujeo a una toma de muestra del biodigestor.

2.2.7.8 Filtro de Sulfato de Cobre

El sulfato de cobre reacciona con el sulfuro de hidrógeno para formar sulfuro de cobre (CuS), esta sustancia tiene una baja solubilidad en agua (K_{ps} de 8×10^{-37}) (Skoog & West, 2015) por lo que es de interés como posible método de tratamiento de biogás. La reacción que ocurre entre el sulfuro de hidrógeno y el sulfato de cobre es la siguiente:



Se preparó una solución saturada de sulfato de cobre pentahidratado de grado comercial con una pureza de 96.7% en agua proveniente de la red local. Inicialmente las pruebas preliminares se realizaron en un vaso de burbujeo conectado a la toma de muestra del biodigestor.

Posteriormente, se fabricó un filtro de prueba con tubería PVC de 4" de diámetro y 1 m de longitud sellada en ambos extremos con tapas de PVC. Se llenó hasta una altura de 4 cm con la solución de sulfato de cobre. El biogás ingresa por la parte superior mediante una tubería de ¾", la cual se conecta a un codo y posteriormente a una tubería perforada para burbujeo de ½", colocada horizontalmente por dentro del tubo. Se colocaron tomas de muestra antes y después del filtro.

3. RESULTADOS

3.1 Composición inicial del biogás

3.1.1 Contenido de H₂S previo al tratamiento

Se encontraron valores de sulfuro de hidrógeno entre 1596 y 1832 ppm, de acuerdo con la bibliografía revisada el biogás contiene típicamente concentraciones de entre 1000 y 20000 ppm, en este caso, se encontraron valores cercanos al límite inferior del rango esperado (Turco *et al.*, 2016), como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Contenido de sulfuro de hidrógeno en el biogás previo al tratamiento

Prueba	H ₂ S [ppm]
1	1832.62
2	1596.16
3	1773.51
4	1655.27

Fuente: Elaboración propia, 2022

Según lo indicado por Morero, la exposición prolongada a más de 100 ppm o 0.01% de sulfuro de hidrógeno puede producir desde dolor de cabeza hasta la pérdida de consciencia y valores de más de 10 ppm generan corrosión tanto en líneas de gas como en equipos por lo que este gas contaminante debe ser removido de 100 a 10 ppm para ser utilizado en la generación de energía (Morero *et al.*, 2010).

3.1.2 Contenido de CO₂ previo al tratamiento

El contenido de CO₂ encontrado fue bajo, variando entre el 31% al 38% en diferentes lotes, valores que concuerdan con la bibliografía revisada. En base a estos datos se determinó que el contenido promedio de dióxido de carbono en el biogás producido es 32.5%, por lo que la composición en promedio de metano será 67.5%. Los resultados obtenidos concuerdan con los presentados por Sunkunaporn *et al.* (2014) y Huertas (2019), quienes destacaron estos resultados como menores a los de otras publicaciones. Comparativamente se puede resaltar que se obtuvieron cantidades menores de dióxido de carbono que en el caso de Herout, que utilizó materia orgánica en base a plantas.

Tabla 5. Contenido de dióxido de carbono en el biogás previo al tratamiento

Prueba	%CO ₂
1	30.8
2	31.9
3	29.0
4	38.4
5	30.0
6	36.8
7	30.5

Fuente: Elaboración propia, 2022.

De acuerdo a la bibliografía, el valor del poder calorífico inferior del metano puro es de 35.8 MJ/m³ (Engineering ToolBox, 2003), con este dato se determinó que el poder calorífico inferior promedio del biogás producido es de aproximadamente 24 MJ/m³.



3.2 Capacidad de remoción de contaminantes de los métodos evaluados

De acuerdo a las características del biodigestor y los datos históricos obtenidos de la producción de biogás como volúmenes de producción, presión y concentraciones de gases contaminantes en el biogás, se seleccionaron métodos de eliminación de contaminantes y se construyeron sistemas de filtración experimentales. Se instalaron en el biodigestor modificando la línea de salida del digestor hacia el medidor, lo que facilitó hacer las mediciones correspondientes y mantener la línea de necesidad. Para cada uno de estos métodos se obtuvieron los siguientes resultados:

3.2.1 Absorción de H₂S con polvo de hierro humedecido

Se determinó el contenido de sulfuro de hidrógeno después de pasar por el filtro con dos métodos de análisis (Tabla 6). El primero corresponde al método cualitativo de detección de sulfuro de hidrógeno correspondiente a la norma NTE INEN 679, este método denotó una coloración café intensa en el papel filtro lo que mostró la presencia de una concentración alta de sulfuro de hidrógeno tras el filtro. Los resultados de la medición instrumental superaron el rango de funcionamiento del equipo (0 – 100 ppm).

Tabla 6. Resultados del filtro de polvo de hierro

	ENTRADA	SALIDA
Presión [mbar]	5	3
Contenido de H ₂ S [Cualitativo]		
Contenido de H ₂ S [ppm]	>100	>100
Contenido de CO ₂ %	31 - 38	31 - 38

Fuente: Elaboración propia, 2022

Por su parte el contenido de CO₂ permaneció igual en ambas pruebas con valores de aproximadamente 38%. Debido a que es difícil determinar con seguridad el óxido producido por el hierro al humedecerse y otro factor como el costo del polvo de hierro de grado analítico, además de los resultados preliminares de esta prueba, no se construyeron filtros consiguientes para pruebas a mayor escala.

3.2.2 Absorción de H₂S con lana de hierro humedecida

Como se muestra en la Tabla 7, la lana de hierro fue capaz de reducir el contenido de sulfuro hasta valores menores a 10 ppm, alcanzando 1 ppm durante las etapas de producción de biogás con caudales menores a 0,3 m³/h, y para el caso de caudales mayores a 0,6 m³/h los valores de estos contaminantes se mantuvieron por debajo de 100 ppm.

Tabla 7. Resultados del filtro de limadura de hierro

	ENTRADA	SALIDA
Presión [mbar]	5	3 - 4
Contenido de H ₂ S [ppm]	1500 - 1900	1 -10 (Caudal bajo) >100 (Caudal alto)
Contenido de CO ₂ %	31 - 38	31 - 38
Volumen de saturación [m ³]	60 - 70	

Nota: Se consideró como caudales bajos valores menores a 0,3 m³/h y caudales altos a valores por encima.

Fuente: Elaboración propia, 2022

Los filtros mostraron un descenso en su capacidad de remoción tras volúmenes de biogás de entre 60 m³ y 70 m³.

3.2.3 Absorción de CO₂ con hidróxido de sodio

En la Tabla 8 se observó que no hubo unas variaciones en la concentración de sulfuro de hidrógeno, pero sí tuvo una reducción en la concentración del CO₂ hasta valores de entre 15% y 20%.

Tabla 8. Resultados del filtro de hidróxido de sodio

	ENTRADA	SALIDA
Presión [mbar]	5	2
Contenido de H ₂ S [ppm]	1500 - 1900	1500 - 1900
Contenido de CO ₂ %	31 - 38	15 - 20

Fuente: Elaboración propia, 2022

Adicionalmente, la formación de cristales de carbonato de sodio alrededor de la tubería de burbujeo del gas generó su taponamiento posterior a un volumen de producción de entre 20 y 30 m³.

3.2.4 Adsorción con zeolitas

No se detectaron cambios en la concentración del dióxido de carbono ni del H₂S, esto puede deberse a que no se alcanzaron temperaturas altas en activación del material por la liberación de los poros o a una posible saturación de los estos con la humedad contenida en el biogás producido.

Tabla 9. Resultados del filtro de zeolita

	ENTRADA	SALIDA
Presión [mbar]	5	<1
Contenido de H₂S [ppm]	1500 - 1900	1500 - 1900
Contenido de CO₂ %	31 - 38	31 - 38

Fuente: Elaboración propia, 2022

Si bien no se observaron cambios en la composición del biogás al pasar por el relleno del filtro de zeolita, se observaron caídas de presión que alcanzaron valores inferiores a 1 mbar.

3.2.5 Adsorción con carbón activado

El filtro de adsorción relleno de carbón activado logró reducir los valores de sulfuro de hidrógeno por debajo de los 100 ppm durante la primera etapa de la producción cuando el caudal de biogás superó los 0,6 m³/h y hasta 1 ppm en caudales menores a 0,3 m³/h. Se observó también una disminución del contenido de dióxido de carbono hasta alcanzar el 25%.

Tabla 10. Resultados del filtro de carbón activado

	ENTRADA	SALIDA
Presión [mbar]	5	<1
Contenido de H₂S [ppm]	1500 - 1900	1 – 10 (Caudal bajo) 20 – 100 (Caudal alto)
Contenido de CO₂ %	31 - 38	25 - 30
Volumen de saturación [m³]		80 - 100

Fuente: Elaboración propia, 2022

Se evidencia una caída de presión que ocasionó que el biogás a la salida del filtro reduzca su presión manométrica por debajo de 1 mbar. Por otra parte, el material del filtro mostró una disminución significativa en su capacidad de remoción tras volúmenes de producción de entre 80 y 100 m³, tras los cuales el contenido de H₂S en el biogás superó los 100 ppm.

3.2.6 Adsorción con sílica gel

El filtro relleno de sílica gel azul logró la reducción de la humedad del biogás desde valores superiores a 80% hasta menos del 50% como se puede observar en la Tabla 11. El filtro quedó saturado completamente tras 2 días de funcionamiento, por lo que no alcanzó a remover humedad durante todo el tiempo de producción.

Tabla 11. Resultados del filtro de sílica gel

	ENTRADA	SALIDA
Presión [mbar]	3	2
Contenido de H₂S [ppm]	1500 - 1900	No
Contenido de CO₂ %	31 - 38	No
Humedad Relativa %	81 - 85	81 – 85 (Caudal alto)
		40 – 50 (Caudal bajo)

Fuente: Elaboración propia, 2022

No se observaron cambios en el contenido de otros gases contaminantes como el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono.

3.2.7 Precipitación de H₂S con acetato de plomo

Se observó tras el burbujeo una coloración café oscura en la solución de acetato como se muestra en la Figura 1. Utilizando tiras de papel filtro humedecidas con esta solución se verificó la presencia de sulfuro de hidrógeno en la corriente de gas, dando como resultado una coloración intensa antes y después del filtro.



Figura 1. Pruebas con acetato de plomo

Fuente: Elaboración propia, 2022

Si bien se demostró que existe una reacción entre el acetato y el biogás que demuestra una remoción de H₂S, dado que esta sustancia no fue detectable de forma visual, su alto riesgo de manipulación y su poca accesibilidad en el mercado, no se continuó con pruebas adicionales. En este caso no se realizaron mediciones cuantitativas para la detección de este gas contaminante.

3.2.8 Precipitación de H₂S con sulfato de cobre

El filtro de solución saturada de sulfato de cobre redujo el contenido de H₂S por debajo de los 100 ppm (Tabla 12); No se observaron cambios en el contenido de dióxido de carbono en las mediciones.

Tabla 12. Resultados del filtro sulfato de cobre

	ENTRADA	SALIDA
Presión [mbar]	5	1
Contenido de H₂S [ppm]	1500 - 1900	50 - 80
Contenido de CO₂ %	31 - 38	31 - 38

Fuente: Elaboración propia, 2022

El filtro logró remover H₂S del biogás mientras la corriente se mantuvo por encima de los 0,3 m³, tras un descenso en el caudal y por consiguiente en la presión manométrica del biogás, la remoción se detuvo y el gas no fue capaz de vencer la presión de la solución para burbujear. Se observó también que ocurrieron caídas de presión de hasta 4 mbar en el biogás de salida del filtro.

3.2.9 Tabla comparativa de resultados

La Tabla 13 muestra un resumen de los resultados obtenidos donde se pueden observar los contrastes entre cada uno de los métodos probados a lo largo de la investigación.

Tabla 13. Capacidad de remoción de diferentes métodos probados

PARÁMETRO	POLVO DE HIERRO	LIMADURA DE HIERRO	HIDRÓXIDO DE SODIO	ZEOLITA	CARBÓN ACTIVADO	SÍLICA GEL	ACETATO DE PLOMO	SULFATO DE COBRE
Concentración mínima de H ₂ S a la salida	>100 ppm*	1 ppm	Sin remoción	Sin remoción	1 ppm	Sin remoción	>100 ppm	50 ppm
Concentración mínima de CO ₂ a la salida	Sin remoción	Sin remoción	15%	Sin remoción	25%	Sin remoción	Sin remoción	Sin remoción
Concentración de humedad	Sin remoción	Sin remoción	Sin remoción	Sin remoción	Sin remoción	40%	Sin remoción	Sin remoción
Caída de presión mbar	2	1 - 2	3	4	4	1	-	4
Volumen de saturación / Kg de material	-	100 m ³	-	-	30 m ³	-	-	-**

*Valores >100 ppm superan el rango de medición del equipo.

**El volumen de saturación se calcula estequiométricamente para la solución.

Fuente: Elaboración propia, 2022

4. DISCUSIÓN

En cuanto a la remoción de sulfuro de hidrógeno, la Tabla 13 muestra que los mejores resultados se obtuvieron utilizando el carbón activado, la limadura de hierro y el sulfato de cobre; estos métodos lograron disminuir el contenido de sulfuro inicial de más de 1500 ppm al final de menos de 10 ppm para las producciones de gas con una presión de 1 mbar y 100 ppm para presiones de 5 mbar. No obstante, ambos métodos tienen la desventaja de generar residuos sólidos, en el caso del carbón activado pueden ser reutilizados tras un tratamiento térmico, para el cual se requiere un equipo capaz de alcanzar temperaturas cercanas a los 600 °C (Giraldo & Moreno-Piraján, 2008), lo que es difícil de lograr en un medio doméstico.

Solo se observó una disminución significativa de dióxido de carbono en el filtro de burbujeo en hidróxido, que redujo la cantidad de CO₂ en casi un 50%; lamentablemente, la formación de carbonato de sodio por la reacción en el filtro generó cristales que taponearon el filtro antes de los 10 días.

5. CONCLUSIONES

El biogás producido a partir de estiércol de cerdo en el biodigestor de la UEPB tiene un alto contenido de ácido sulfhídrico (entre 1600 y 1900 ppm) lo que limita su aplicación en la generación de energía eléctrica. La remoción de sus contaminantes es imperativa para su uso como combustible.

El carbón activado tiene un alto potencial como método de remoción de gases contaminantes, este además tiene la ventaja de poder ser reactivado en hornos de calcinación a altas temperaturas, no obstante, estos equipos son poco accesibles para instalaciones en el área rural.

La remoción de dióxido de carbono por precipitación utilizando hidróxido de sodio es accesible pero el riesgo que conlleva la manipulación de esta sustancia y la formación de cristales de carbonato de sodio dificultan la operación de este método.

Los filtros de limadura de hierro siguen siendo económicamente accesibles y de fácil mantenimiento pese a los desechos sólidos generados, este método resulta ideal para instalaciones rurales y de pequeña escala.

La solución saturada de sulfato de cobre demostró ventajas como su alta capacidad de remoción de sulfuro de hidrogeno, disponibilidad entre otros; la desventaja principal que se pudo observar de esta solución es el requerimiento de presión para garantizar su efectividad.

6. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Privada del Valle, por el financiamiento otorgado para la realización de este proyecto a través de su Dirección de Investigación. Al departamento y laboratorio de Petróleo, Gas y Energías por su colaboración en el proyecto y prestar sus instalaciones para el desarrollo del mismo.

7. REFERENCIAS

Engineering ToolBox. (2003). *Engineering ToolBox*. Obtenido de Fuels - Higher and Lower Calorific Values: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

Figuroa, C., Alegría, C., Meza, V., & Quipuzco, L. (2019). *Eficiencia de la desulfuración del biogás mediante biofiltración empleando soportes orgánicos*. Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional de Trujillo.

Garfí, M. M.-H. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 60, 599-614.

Giraldo, L., & Moreno-Piraján, J. (2008). *Monolitos de carbón activado a partir de cáscara de coco e impregnación con níquel y cobre*. Revista Colombiana De Química.

Hassan, S., Maher, M., Janna, Q., Kholoud, J., & Eldon. (2020). *Removal of hydrogen sulfide from biogas using activated carbon synthesized from different locally available biomass wastes - a case study from Palestine*.

Herout, M., Malaťák, J., Kučera, L., & Dlabaja, T. (2011). Biogas composition depending on the type of plant biomass used. *Research in Agricultural Engineering*, 57(4), 137-143.

Huertas, J., Quipuzco, L., Hassanein, A., & Lansing, S. (2020). Comparing hydrogen sulfide removal efficiency in a field-scale digester using microaeration and iron filters. *Energies*, 13(18), 4793.

Marín De Jesus, D. F. (2021). *Innovative technologies for biogas upgrading*. Universidad de Valladolid.

MHE. (2021). *Balance Energetico Nacional*. Bolivia: Ministerio de Hidrocarburos y Energia.

Morero, B., Gropelli, E., & Campanella, E. (2010). *Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás*. Obtenido de Repositorio Digital de la Universidad de Palermo: <https://dspace.palermo.edu/dspace/handle/10226/1377>

Nuntón, S. (2018). *Influencia de la temperatura y Ph en el rendimiento de obtención de biogás a partir de bagazo de caña y estiércol de equino mediante un Digestor Batch*. Lambayeque, Peru: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Ortega, L., Bárcenas, L., Fernández, E., & Rodríguez, S. (2015). Principales métodos para la desulfuración del biogás. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental; ISSN 1680-0338*, p. 45 - 56.

Ponce, E. (2016). *Métodos sencillos en obtención de biogás rural y su conversión en electricidad*. Chile: IDESIA.

Rivero, O. (2009). Biogás en Bolivia, programa “viviendas autoenergéticas” una nueva forma de ver el futuro energético ambiental del país en el área rural. *Revista Desarrollo Local Sostenible*, 3.

-
- Romat, L., Fernandez, G., Fabrizio, A., & Bargiela, M. (2021). Obtención de biogás a partir de efluentes porcinos como alternativa de mitigación de emisiones. *Revista RedBioLAC*, 5(1), 55-59.
- Skoog, D., & West, D. (2015). *Química Analítica*. Santa Fé, México: Cengage Learning.
- Suntikunaporn, Echaroj, & Rimpikul. (2014). *Evaluation of Agricultural Wastes for Biogas Production*. Thammasat International Journal of Science and Technology.
- Tornero, A. G., & Ramírez, J. A. (2015). *Técnicas para la disminución en la concentración de ácido sulfhídrico en el biogás*.
- Turco, M., Ausielo, A., & Micoli, L. (2016). *Treatment of Biogas for Feeding High Temperature Fuel Cells*. Suiza: Springer.
- Varnero, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile: FAO.
- Varnero, M., Caru, M., Galleguillos, K., & Achondo, P. (2012). *Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica*.
- WBA. (2020). *Global Bioenergy Statistics 2020*. WBA.