



Comparación entre un sistema biológico y un sistema químico para la remoción de sulfuro de hidrógeno presente en un biogás generado a partir de POME

Gabriel Adolfo Agudelo Echavarría

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental

Director

Ph.D. Francisco José Molina Pérez

Codirector:

Ph.D. Mariana Peñuela Vásquez

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita

(Agudelo Echavarría, Molina Pérez & Peñuela Vásquez, 2023)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Agudelo Echavarría, G. A., Molina Pérez, F. J., & Peñuela Vásquez, M. (2023). *Comparación entre un sistema biológico y un sistema químico para la remoción de sulfuro de hidrógeno presente en un biogás generado a partir de POME* [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Maestría en Ingeniería Ambiental, Cohorte XXV.

Grupo de Investigación Bioprocesos.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

*A mi madre Beatriz
a Diana, Paula y María Antonia
por todo su amor*

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por ser partícipes activos en este proceso de aprendizaje, generando la confianza necesaria para culminarlo de la mejor manera.

a los profesores Francisco Molina y Mariana Peñuela por su tiempo, sus enseñanzas y consejos durante todo este tiempo.

A Aura Ramón, Marcela Mosquera y todos los integrantes de los grupos de investigación Bioprocesos y GAIA por sus aportes tan significativos.

Al Programa Colombia científica como fuente de financiación, en el marco de las convocatorias Ecosistema científico, contrato No. FP44842- 218-2018.

Esta tesis fue financiada por el programa nacional de ciencia, tecnología e innovación en energía y minería, según 792-2017 2ª convocatoria ecosistema científico para la financiación de programas de I+D+i, a través del Proyecto: "Valoración energética de residuos sólidos urbanos y agroindustriales" (Código: 60612) ejecutado por la Universidad de Antioquia. Por último, a la Universidad de Antioquia.

Resumen

En Colombia, las energías alternativas cada día ganan mayor relevancia en la oferta energética, las oportunidades son grandes gracias a la ley 1715 de 2014, la cual promueve el desarrollo de estas, especialmente el biogás poco a poco se va convirtiendo en un actor activo de esta producción energética en el sistema interconectado nacional, pero uno de los principales inconvenientes a la hora de transportar y usar biogás es la calidad de este; la presencia de impurezas y elementos trazas como es el caso del sulfuro de hidrógeno, disminuyen en gran medida su capacidad calorífica, sin mencionar los efectos negativos que produce el sulfuro de hidrógeno en los equipos.

Este trabajo se realizó con el fin de aportar nuevos elementos al conocimiento de la purificación de biogás producido en el país, y especialmente en el departamento de Antioquia, donde se investigó la purificación parcial de un biogás generado a partir de agua residual, proveniente del molino de extracción del proceso de generación de aceite de palma (POME) a través de la eliminación del sulfuro de hidrógeno de la mezcla gaseosa mediante el uso de las técnicas de adsorción química no regenerativa con lana de acero y biofiltración, estableciendo la eficiencia del proceso de remoción de dichas técnicas. Para el desarrollo de esta investigación se contempló el diseño y construcción a escala de laboratorio, de los reactores específicos tanto para la adsorción química no regenerativa con lana de acero como para la biofiltración.

Los resultados indicaron que el reactor de adsorción química con lana de acero proporcionó un porcentaje de remoción máximo de sulfuro de hidrógeno de 99% para un flujo de $27,7 \text{ Lh}^{-1}$ de biogás mientras que el biofiltro obtuvo un porcentaje de remoción máximo del 91% para un flujo de $27,7 \text{ Lh}^{-1}$ de biogás para una concentración de H_2S $1327 \pm 672 \text{ ppm}$, esto sujeto a la sensibilidad propia de cada sistema ante el aumento o disminución de las variables operacionales. Adicionalmente, se realizó un análisis económico de la construcción de los reactores a escala laboratorio para un volumen de operación de 90 Lh^{-1} , obteniendo así que la construcción del reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero en pesos colombianos es el doble de lo que cuesta la construcción del biofiltro.

Se espera que los resultados obtenidos en este trabajo de investigación sean significativos y contribuyan al fortalecimiento de los programas de uso seguro de energías alternativas, transición energética y en el control de malos olores tanto en sistemas de digestión anaerobia como en procesos que usan los productos y subproductos provenientes de los mismos.

Palabras clave: Purificación biogás, Control de olores, Sulfuro de Hidrógeno, adsorción Química, Biofiltración.

Abstract

In Colombia, alternative energies are gaining more relevance every day in the energy supply, the opportunities are great thanks to Law 1715 of 2014, which promotes the development of these, especially biogas is gradually becoming an active player in this energy production in the national interconnected system, but one of the main drawbacks when transporting and using biogas is the quality of this; The presence of impurities and trace elements, such as hydrogen sulfide, greatly diminish its calorific capacity, not to mention the negative effects that hydrogen sulfide has on the equipment.

This work was carried out with the purpose of contributing new elements to the knowledge of the purification of biogas produced in the country, and especially in the department of Antioquia, where the partial purification of a biogas generated from wastewater was investigated, from the extraction mill of the palm oil generation process (POME) through the elimination of hydrogen sulfide from the gaseous mixture by using non-regenerative chemical adsorption techniques with steel wool and biofiltration, establishing the efficiency of the removal process of these techniques. For the development of this research, the design and construction at laboratory scale of specific reactors for both non-regenerative chemical adsorption with steel wool and biofiltration were contemplated.

The results indicated that the chemical adsorption reactor with steel wool provided a maximum hydrogen sulfide removal percentage of 99% for a flow of 27.7 Lh^{-1} of biogas while the biofilter obtained a maximum removal percentage of 91% for a flow of 27.7 Lh^{-1} of biogas for a H_2S concentration of $1327 \pm 672 \text{ ppm}$, subject to the sensitivity of each system to the increase or decrease of the operational variables. Additionally, an economic analysis of the construction of the reactors at laboratory scale for an operating volume of 90 Lh^{-1} was carried out, thus obtaining that the construction of the non-regenerative chemical adsorption reactor with steel wool in Colombian pesos is double the cost of the construction of the biofilter.

It is expected that the results obtained in this research work will be significant and will contribute to the strengthening of programs for the safe use of alternative energies, energy transition and odor control both in anaerobic digestion systems and in processes that use the products and by-products from them.

Keywords: Biogas purification, Odor control, Hydrogen Sulfide, Chemical adsorption, Biofiltration.

Contenido

Pág.

Resumen	IV
Abstract	VI
Contenido	VII
Lista de figuras	X
Lista de Tablas	XII
Lista de abreviaturas	XIV
1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema	1
3. Justificación	3
4. Objetivos	4
4.1 Objetivo general.....	4
4.2 Objetivos específicos	4
5. Marco teórico	5
5.1. Biogás	5
5.2. Características del biogás a partir de POME	5
5.3. Impurezas y problemas	6
5.4. Purificación de Biogás	6
5.4.1. <i>Remoción de H₂S en un proceso de biofiltración</i>	7
5.4.2. <i>Adsorción química en una superficie sólida óxido de hierro</i>	8
5.4.3. <i>Parámetros que afectan la remoción de H₂S</i>	10
6. Metodología	11

6.1. Diseño y construcción de un sistema de biofiltración y de un reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero	11
6.1.1. <i>Diseño de biofiltro para la purificación de biogás</i>	12
6.1.2. <i>Construcción del biofiltro</i>	12
6.1.3. <i>Aislamiento de Microorganismos</i>	12
6.1.4. <i>Diseño del reactor químico de adsorción química no regenerativa con lana de acero para la purificación</i>	19
6.1.5. <i>Construcción del reactor químico</i>	19
6.2. Eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno en un sistema de biofiltración y un reactor de adsorción química	20
6.3. Análisis estadístico y económico de un sistema de biofiltración y un reactor de adsorción química para la eliminación de sulfuro de hidrógeno presente en un biogás.	23
6.3.1. <i>Análisis de la información</i>	23
6.3.2. <i>Análisis económico</i>	23
7. Resultados y discusión	24
7.1. Diseño de biofiltro para la purificación	24
7.1.1. <i>Construcción del biofiltro</i>	26
7.2. Diseño y construcción del reactor químico para la purificación.....	30
7.3. Eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno en un sistema de biofiltración y un reactor de adsorción química	35
7.3.1. <i>Evaluación de la eficiencia de remoción del biofiltro</i>	35
7.3.2. <i>Evaluación de la eficiencia de remoción del reactor químico con lana de acero</i>	38
7.4. análisis estadístico y económico de un sistema de biofiltración y un reactor de adsorción química para la eliminación de sulfuro de hidrógeno presente en un biogás.	41
7.4.1. <i>Análisis estadístico y económico del biofiltro</i>	41

7.4.2. Análisis estadístico y económico reactor químico no regenerativo 49

8. Conclusiones 56

9. Recomendaciones 58

Referencias 59

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Muestra la superficie con desprendimiento de capa que fue atacada por la corrosión, en un cuerpo de ensayo expuesto directamente a la llama de combustión del biogás. (Fontenelle et al., 2017).</i>	6
Figura 2. <i>Lana de acero.</i>	9
Figura 3. <i>Diagrama de flujo de la metodología (elaboración propia).</i>	11
Figura 4. <i>Esterilización del material requerido para el aislamiento y crecimiento.</i>	14
Figura 5. <i>Suspensión de microorganismos.</i>	14
Figura 6. <i>Agitación constante solución #2.</i>	15
Figura 7. <i>Agares de confirmación.</i>	16
Figura 8. <i>Corte de material para compost.</i>	17
Figura 9. <i>Material seco y fino para controlar olor y humedad.</i>	17
Figura 10. <i>Compostera llena.</i>	18
Figura 11. <i>Disminución de volumen en el proceso de compostaje.</i>	18
Figura 12. <i>Monitoreo del compost.</i>	19
Figura 13. <i>Malla de nylon sin nudo de 3 mm.</i>	20
Figura 14. <i>Esquema de remoción de sulfuro de hidrógeno (elaboración propia)</i>	22
Figura 15. <i>Diseño del biofiltro en SOLIDWORKS.</i>	26
Figura 16. <i>Ensamble del biofiltro con malla.</i>	27
Figura 17. <i>Seguimiento de la temperatura del compost (elaboración propia).</i>	27
Figura 18. <i>Material filtrante (Compost).</i>	28
Figura 19. <i>Preparación prueba de confirmación.</i>	29

Figura 20. <i>Jarras de anaerobiosis con los dos agares de confirmación.</i>	29
Figura 21. <i>Confirmación de la presencia de bacterias sulfooxidantes en agar de Bismuto con aerobiosis (ensayos superiores) y anaerobiosis (ensayos inferiores).</i>	29
Figura 22. <i>Confirmación de la presencia de bacterias sulfooxidantes en agar TSC con aerobiosis (ensayos superiores) y anaerobiosis (ensayos inferiores).</i>	30
Figura 23. <i>Diseño del reactor de adsorción química con lana de acero en SOLIDWORKS.</i>	32
Figura 24. <i>Lana comercial (parte superior) vs Lana oxidada (parte inferior).</i>	33
Figura 25. <i>Reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero (medidas en mm).</i>	34
Figura 26. <i>Biofiltro (medidas en mm).</i>	34
Figura 27. <i>Gráfica tasa de carga vs capacidad de eliminación para el biofiltro (elaboración propia).</i>	37
Figura 28. <i>Gráfica de tasa de carga vs capacidad de eliminación del reactor de adsorción química.</i>	40
Figura 29. <i>Diagrama de Cajas de Eficiencia vs flujo de biogás.</i>	42
Figura 30. <i>Diagrama de Cajas de Eficiencia vs Altura material filtrante.</i>	43
Figura 31. <i>Esquema de interacción de combinaciones del biofiltro.</i>	44
Figura 32. <i>Gráfico de interacción en el biofiltro.</i>	46
Figura 33. <i>Diagrama de Cajas de Eficiencia vs Masa Adsorbente</i>	49
Figura 34. <i>Diagrama de Cajas de Eficiencia vs Flujo de Biogás.</i>	50
Figura 35. <i>Esquema de interacción de combinaciones.</i>	51
Figura 36. <i>Gráfico de interacción en el reactor de adsorción química.</i>	53

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Ventajas y desventajas del proceso de purificación de H₂S mediante biofiltración (elaboración propia).</i>	7
Tabla 2. <i>Medios de Cultivo (elaboración propia).</i>	15
Tabla 3. <i>Agares de confirmación (elaboración propia).</i>	15
Tabla 4. <i>Datos de diseño para un tiempo de retención de 50 segundos (elaboración propia).</i> ..	33
Tabla 5. <i>Variables del diseño de experimentos (elaboración propia).</i>	35
Tabla 6. <i>Factores y Niveles del diseño de experimento (elaboración propia).</i>	36
Tabla 7. <i>Diseño de experimentos Biofiltro (elaboración propia).</i>	36
Tabla 8. <i>Variables del diseño de experimentos (elaboración propia).</i>	38
Tabla 9. <i>Factores y niveles del diseño de experimento (elaboración propia).</i>	39
Tabla 10. <i>Diseño de experimentos reactor químico (elaboración propia).</i>	39
Tabla 11. <i>Tratamientos de los niveles analizados para el flujo de biogás ingresado al reactor químico.</i>	43
Tabla 12. <i>Test Kruskal-Wallis para la altura de material filtrante y flujo de biogás (elaboración propia).</i>	44
Tabla 13. <i>Pairwise.willcox: Comparación de la Altura material filtrante (0,14; 0,28 y 0,42 m) para la eficiencia (elaboración propia).</i>	45
Tabla 14. <i>Pairwise.willcox: Comparación del flujo de biogás (27,7; 55 y 85,1 Lh⁻¹) para la eficiencia (elaboración propia).</i>	45
Tabla 15. <i>Recopilación de los precios de materiales para la construcción del biofiltro (elaboración propia).</i>	48
Tabla 16. <i>Tratamientos y combinaciones de factores (elaboración propia).</i>	50
Tabla 17. <i>Análisis de varianza.</i>	51
Tabla 18. <i>Prueba Pairwise.willcox Eficiencia y masa de adsorbente (elaboración propia).</i>	52
Tabla 19. <i>Pairwise.willcox Eficiencia y flujo de biogás (elaboración propia).</i>	52

Tabla 20. <i>Recopilación de los precios de materiales para la construcción del reactor de adsorción química con lana de acero (elaboración propia).</i>	54
Tabla 21. <i>Recopilación de la información (elaboración propia)</i>	55
Tabla 22. <i>Conclusión (Elaboración propia).</i>	56

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
H ₂ S	Sulfuro de Hidrógeno
CH ₄	Metano
NH ₃	Amoniaco
CO ₂	Dióxido de carbono
POME	Agua residual del proceso de generación de aceite de palma
mm	Milímetro
ER	Eficiencia de remoción
TC	Tasa de carga
CE	Capacidad de eliminación
Q	Flujo de biogás
V	Volumen Útil
ppm	<i>Partes por millón</i>
g	<i>gramos</i>

1. Introducción

El biogás es una fuente de energía renovable y sostenible, producido por fermentación anaeróbica de materia orgánica. El biogás generalmente contiene un porcentaje de 55 a 70% de metano (CH_4), 30 a 45% de dióxido de carbono (CO_2) y constituyentes menores tales como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3) (FAO et al., 2011).

El H_2S es el contaminante más común que restringe el uso directo de biogás ya además de los olores tóxicos, afecta negativamente la estructura y el rendimiento de la generación eléctrica al corroer algunos componentes críticos del motor y de las turbinas, es necesario removerlo para mejorar la calidad del biogás. La concentración de H_2S en el biogás puede variar de 0,1 a 2,0% es decir a (1.000 – 20.000 ppm). Sin embargo; los valores límites de concentración recomendados están entre 0,01 a 0,03% v/v (100 a 300 ppm) para controlar el problema de la corrosión en los sistemas de generación y transporte (Torres-Calderón et al., 2020). Por ello, se hace necesaria la aplicación de una metodología de tratamiento económica, accesible y eficiente para el biogás generado a partir de residuos urbanos y agroindustriales, sin desconocer los estándares de calidad requeridos de acuerdo con el uso final de biogás.

En este sentido, la purificación de biogás ofrece varios beneficios, no sólo en el control de olores en los sistemas de digestión anaerobia sino también a la hora de diversificar el horizonte de usos que se le puede dar al biogás ya tratado, esto puede facilitar tanto el uso directo en combustión del biogás como la inyección de este a la red de abastecimiento energético, y de esta forma diversificar técnicamente el mercado energético en Colombia.

Teniendo en cuenta lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de desulfuración de biogás generado en un reactor a escala de laboratorio que usa como materia prima POME (efluente de aceite de palma proveniente del molino), mediante la comparación de la eficiencia de dos tecnologías de remoción, adsorción química empleando lana de hierro tratadas y biofiltración. En esta investigación, se diseñó y construyó un sistema de adsorción química no regenerativa con lana de acero y un reactor de biofiltración, posteriormente se abordó la evaluación de la remoción de sulfuro de hidrógeno para cada una de las tecnologías antes mencionadas, de acuerdo con marcadores de eficiencia y carga. Por último, se realizó una comparación técnica y económica basada en los resultados de remoción bajo los parámetros operacionales y los costos de construcción asociados al reactor químico y a la biofiltración.

2. Planteamiento del problema

La generación de biogás cada vez toma más fuerza frente a la disposición y gestión de los residuos orgánicos agrícolas, pecuarios y urbanos generados en los sectores de nuestra sociedad, que se está convirtiendo en un problema creciente, debido a la generación de lixiviados y gases efecto invernadero que pueden llegar a ser tóxicos para el ser humano. Tales problemas se evidencian, en la ocupación máxima de rellenos sanitarios en poco tiempo, dado que en 2015 el 69% de los rellenos sanitarios del país contaban con una vida útil entre cero y cinco años (El Colombiano, 2015).

El biogás generado en los procesos anaerobios y de fermentación por lo general contienen impurezas y elementos trazas que deben ser eliminados antes de ser usado como combustible, ya que estas impurezas y especialmente el sulfuro de hidrógeno es tóxico para el ser humano y puede generar severas afectaciones: como irritaciones de áreas expuestas hasta convulsiones y muerte cuando se es expuesto a altas concentraciones de este compuesto. (Gallo, 2017); para el sulfuro de hidrógeno, el límite de exposición recomendado (REL) según NIOSH es de 10 ppm, que nunca debe excederse durante el periodo de 10 minutos (NIOSH, 1994).

Por otro lado, las impurezas del biogás causan daños a los equipos de aprovechamiento, este daño consiste en el deterioro estructural de estos instrumentos debido al contacto con sulfuro de hidrógeno (H_2S) y humedad, esto pueden llevar a disminuir la vida útil de la maquinaria usada en la generación y transferencia de energía eléctrica, esta maquinaria comprende equipos de combustión, generadores y calderas, la corrosión causada cuando el sulfuro de hidrógeno entra en contacto con la matriz de acero a una temperatura de $20^{\circ}C$ es entre 0,1-1 mm por año, no obstante si se incrementa la temperatura y hay presencia de un ambiente húmedo esta afectación aumenta a 1-3 mm por año y a $100^{\circ}C$ a 10 mm por año (Latosov et al., 2017).

La eliminación de impurezas y elementos trazas como el sulfuro de hidrógeno, ayuda a la obtención de un gas con mayor cantidad de biometano el cual posee un alto poder calorífico, además cabe resaltar que la producción de biometano, aporta significativamente a la obtención de objetivos climáticos, al reemplazar las emisiones de gases efecto invernadero proveniente de la combustión parcial de fuentes fósiles (Hidalgo et al., 2020).

Es relevante, no solo, entablar una transición segura y eficiente de generación eléctrica a partir de fuentes no renovables a una energía limpia, además de buscar y propiciar procesos de limpieza y purificación del biogás resultante de los procesos microbianos. Este gran reto no se basa solo en promover nuevas tecnologías, sino también en implementar procesos y

metodologías de bajo costo de adquisición y operación como a su vez procesos amigables con el medio ambiente, todo ello respetando a cabalidad las expectativas de generación y las políticas de salud locales, teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente se hace necesaria la evaluación de tecnologías de fácil acceso y bajos costos como la adsorción química no regenerativa y la biofiltración para la remoción de sulfuro de hidrógeno presente en un biogás obtenido a partir de POME.

3. Justificación

Bajo un contexto de transición energética segura y eficiente de las energías tradicionales a las energías alternativas, este trabajo de investigación se realizó con el fin de desarrollar conocimiento sobre la comparación de dos sistemas de purificación del biogás: adsorción química no regenerativa y biofiltración, tecnologías de bajo costo de construcción en comparación otras tecnologías de purificación como la separación criogénica y por membrana.

La limpieza del biogás es necesaria para solucionar los inconvenientes generados no sólo por corrosión en los instrumentos de transporte y generación eléctrica como consecuencia de las altas concentraciones de H_2S , sino también para minimizar el riesgo de exposición que poseen los seres humanos a este gas tóxico, ya que se han registrado casos donde la inhalación de sulfuro de hidrógeno ha causado afectaciones crónicas y agudas a personas, estas afectaciones van desde náuseas, irritación ocular y pulmonar, dolores de cabeza, pérdida de sueño hasta inconvenientes permanentes por exposición prolongada, tales como edemas pulmonares, pérdida de conciencia y daños neurofuncionales (Guidotti, 2010), además de estos dos inconvenientes se suma un tercero y no menos importante, es el control de malos olores generados ya sea en procesos anaerobios como en los diferentes sectores municipales, entre las instalaciones municipales que emiten gases nocivos más persistentes tenemos las plantas de tratamiento de aguas, plantas de gestión de residuos o compostaje, entre otras, aportando olores generados por compuestos de azufre (ácido sulfhídrico, tioles, sulfuros y desulfuros de alquilo), compuestos nitrogenados (amoníaco y aminas alifáticas), compuestos orgánicos (aldehídos, cetonas) y ácidos grasos (Barbusinski et al., 2021).

Por ello se hace necesaria la evaluación de la remoción de sulfuro de hidrógeno presente en un biogás usando reactores construidos con materiales de baratos y de fácil acceso, además, como factor adicional a esta purificación se minimiza el riesgo a la salud humana si eventualmente se produce un contacto directo con el biogás que no se ha tratado.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Evaluar la remoción del sulfuro de Hidrógeno de un biogás, generado a partir de POME, entre un reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero y un sistema de biofiltración.

4.2 Objetivos específicos

- Diseñar dos sistemas a escala de laboratorio de purificación de sulfuro de hidrógeno, uno basado en la tecnología de adsorción química y el otro en la de biofiltración.
- Comparar la eficiencia en la remoción de sulfuro de hidrógeno de los dos sistemas construidos en función de sus condiciones de operación.
- Establecer la mejor alternativa en la remoción de sulfuro de hidrógeno a nivel técnico y económico.

5. Marco teórico

5.1. Biogás

Actualmente la producción de biogás se ve enmarcada por la gran cantidad de entornos en los cuales se puede llevar a cabo su generación, entre ellas tenemos los rellenos sanitarios, los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales, lixiviados provenientes de material estancado y por supuesto, durante la degradación anaerobia de material orgánico. El biogás como mezcla de gases posee típicamente una concentración de metano alrededor de 40-75%, dióxido de carbono de 25-60% (Omar et al., 2019), y otros compuestos incluyendo el sulfuro de hidrógeno, vapor de agua, hidrógeno, oxígeno y otros compuestos de gases o materiales trazas (Rajivgandhi et al., 2014).

Específicamente el metano contenido en el biogás es un poderoso gas de efecto invernadero (Arellano et al., 2017), si este es suministrado de forma directa o indirecta a la atmósfera, pero también se puede catalogar como una importante fuente de energía renovable, ya que aporta en gran medida al poder calorífico del biogás a un 60% es de 21,5 MJ/Nm³, si comparamos este valor con el poder calorífico del gas natural (35,8 MJ/Nm³) (Moreno, 2014; López et al., 2017), se puede afirmar que esta diferencia se debe principalmente al CO₂ y elementos trazas presentes en el biogás, lo cual además de disminuir los beneficios energéticos de este aumenta los costos de compresión y transporte del mismo, sin contar afectaciones producidas por corrosión, todo lo expuesto anteriormente limita la viabilidad económica de la implementación del biogás (FAO et al., 2011).

5.2. Características del biogás a partir de POME

Al realizar el proceso de extracción de aceite de palma se requiere de cantidades significativas de agua para las etapas de esterilización por vapor y clarificación, esto trae como resultado la producción de grandes cantidades de agua residual o comúnmente llamado efluente del molino de aceite de palma (Palm Oil Mill Effluent, POME).

El POME es un líquido concentrado parduzco de naturaleza ácida con un pH en el rango de 3,5 a 5,0; se descarga a una temperatura de 80-90°C; y, está compuesto por 95-96% de agua, de sal y sólidos en suspensión en un rango de 18.000-46.011 mg/L y un alto contenido de aceite y grasa en un rango de 4.000-9.341 mg/L (Wang et al., 2015)., así como material celulósico, dependiendo de la eficiencia y control del proceso (Khadaroo et al., 2019). POME se caracteriza por una alta demanda química de oxígeno (DQO) de 50.000 mg/L y una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 25.000 mg/L aproximadamente.

5.3. Impurezas y problemas

La purificación del biogás producido por medios anaeróbicos trae como consecuencia el aumento en la concentración de metano, alcanzando valores de 96-99% lo que permite ampliar los panoramas en los que se puede implementar, tales como: generación eléctrica, calórica, combustible vehicular, entre otros (Adnan et al., 2019), para estos fines es necesario la eliminación de los elementos trazas o contaminantes presentes en esta mezcla gaseosa, y específicamente la eliminación de CO_2 para mejorar el poder calorífico neto del biogás generado y la eliminación del sulfuro de hidrógeno, (Varnero et al., 2012), en presencia de un ambiente húmedo, el sulfuro de hidrógeno genera celdas micro galvánicas localizadas en la superficie de los materiales antes mencionados, lo cual provocan corrosión por picadura, fisuración y disolución de las paredes metálicas como se observa en la figura 1. (Peña & Fuentes, 2007).

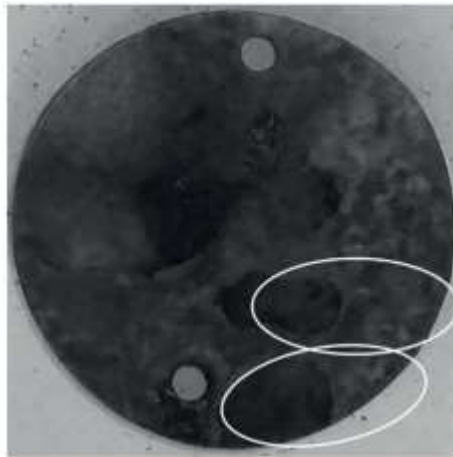


Figura 1. Muestra la superficie con desprendimiento de capa que fue atacada por la corrosión, en un cuerpo de ensayo expuesto directamente a la llama de combustión del biogás. (Fontenelle et al., 2017).

Además, de esta corrosión generada en la superficie del material que compone estos equipos de generación y transporte, se deja expuesta la matriz interna del mismo, ello se puede ver reflejado en la vulnerabilidad de tal estructura, la cual puede ser afectada por otros compuestos como el hidrógeno, lo cual puede desencadenar una desestabilización la matriz por presiones generadas dentro de ella y consecuentemente la aparición de rupturas y daños irreversibles en los equipos (Asrar et al., 2016; Peña & Fuentes, 2007).

5.4. Purificación de Biogás

Actualmente existen varias técnicas para la purificación del biogás generado naturalmente y en los diferentes campos de producción, entre estas tecnologías encontramos: biofiltración,

adsorción química, separación criogénica, separación por membrana, adsorción y absorción física, lavado con agua entre otras (Niesner et al.,2013). En su mayoría, estas tecnologías presentan altos requerimientos económicos y energéticos, tanto para su construcción como operación, específicamente la biofiltración y la adsorción química regenerativa como no regenerativa, sobresalen de esta lista ya que presentan buenos resultados en la eliminación de sulfuro de hidrógeno y a diferencia de las demás tecnologías no presentan costos tan elevados a la hora de su construcción y operación (Moreno, 2014; Adnan et al., 2019).

5.4.1. Remoción de H₂S en un proceso de biofiltración

El biogás es un gas que puede ser usado para la generación de energía ya sea en forma de calor cuando se realiza combustión de este o puede ser usado para generar energía eléctrica por medio de moto-generadores, la cual después puede ser inyectada a la red eléctrica. Sin embargo, el proceso anaerobio de producción del biogás sintetiza elementos tóxicos y corrosivos como el sulfuro de hidrógeno, que impactan negativamente los elementos de transporte y de generación eléctrica que involucran el uso del biogás, la tecnología de la biofiltración presenta varias ventajas y desventajas (ver tabla 1) en comparación a otras tecnologías de remoción de sulfuro de hidrógeno como es la remoción por adsorción química, por membrana, etc.

La biofiltración es una alternativa prometedora para remover el H₂S del biogás mediante su oxidación, esta técnica consiste en una columna de lecho empacado, en donde microorganismos especializados en la oxidación de los compuestos reducidos de azufre son inmovilizados o contenidos, los flujos involucrados en el proceso están en contracorriente, el biogás asciende y un flujo de líquido desciende (específicamente agua de compensación y nutrientes), este líquido tiene como finalidad controlar variables operacionales como humedad, pH, nutrientes necesarios para el crecimiento o proliferación de la comunidad microbiana necesaria para la remoción, entre otros.

Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso de purificación de H₂S mediante biofiltración (elaboración propia).

Ventajas	Desventajas
Costos de inversión y operación bajos	A caudales grandes se requieren grandes áreas efectivas de biofiltración
Ambientalmente amigable	Requiere periodos de adaptación del micro ecosistema
Remoción eficiente.	Difícil de moldear, requiere trabajo experimental.
Flexibilidad para diferentes contaminantes.	No aplica a compuestos no biodegradables.

5.4.1.1. Parámetros a tener en cuenta en la biofiltración

- **Tipo de contaminante:** este parámetro afecta directamente la eficacia de la biofiltración. Por tal razón se deben tener en cuenta variables operacionales tales como pH y contenido de humedad entre otros. La tasa de biodegradación está relacionada con las cepas microbianas establecidas en el lecho filtrante, con la concentración y la configuración química del gas teniendo en cuenta que existen gases solubles y poco solubles (Benavente et al., 2019).
- **Lecho filtrante:** proporciona el apoyo para el crecimiento microbiano. Para ello, los lechos filtrantes deben cumplir con las siguientes características: una alta área superficial específica para favorecer el establecimiento y mantenimiento de la microflora y el intercambio de gas entre la biopelícula y el gas; una alta porosidad para promover la distribución homogénea de gases a lo largo de la cama, además de una buena capacidad de retención de agua para evitar la desecación; la presencia y disponibilidad de nutrientes intrínsecos para mantener la microflora acompañante (Muñoz, 2007; Benavente et al., 2019).
- **Tasa de flujo** tiene un impacto significativo en el rendimiento de la biodegradación y la transferencia de difusión del contaminante de la fase gaseosa a la biopelícula. Para cada sistema de biofiltración es diferente y depende de las condiciones operativas, la concentración del gas contaminante, el nivel de biodegradabilidad y los volúmenes de lecho disponible (Muñoz, 2007)

5.4.2. Adsorción química en una superficie sólida óxido de hierro

El proceso de quimisorción es un fenómeno que se basa en la interacción de una molécula procedente de otra fase sobre la superficie de un sólido, lo que permite que uno o más compuestos objetivo se separen por medio de reacciones químicas de una manera selectivas. La adsorción se lleva a cabo principalmente en filtros o lechos empacados de sólidos en forma ordenada o desordenada y su funcionamiento depende de ciertos parámetros operacionales.

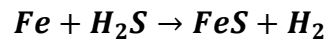
Se emplea un lecho fijo con un compuesto de hierro como material adsorbente, el mecanismo de adsorción depende ampliamente de las características del adsorbente como la porosidad, área superficial, así como de los parámetros de operación (concentración de H₂S, cantidad de adsorbente, temperatura y presión, entre otros) (Gómez & Roa, 2020). Entonces la lana de acero se convierte en un buen material adsorbente por su alta capacidad de adsorción, propiedades físicas, tamaño de partícula, costo bajo (Figura 2).



Figura 2. Lana de acero.

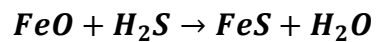
Teniendo en cuenta la composición de la lana de acero (compuesta principalmente por hierro), son importantes las reacciones (ecuación 1 y 4) que pueden ocurrir entre este material adsorbente y el sulfuro de hidrógeno como compuesto a retirar para llevar a cabo una adsorción química efectiva (Gómez & Roa, 2020).

Ecuación 1. *Reacción de sulfidación del hierro metálico*

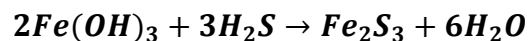


Sin embargo, diversos estudios cinéticos han demostrado (Torres-Calderón et al., 2020; Gómez & Roa, 2020) que la velocidad de reacción entre el hierro y el sulfuro de hidrógeno aumenta considerablemente si se ven involucrados compuestos como óxidos e hidróxidos, presentando las siguientes reacciones (ecuaciones 2 y 3):

Ecuación 2. *Reacción de sulfidación del óxido de hierro (II).*

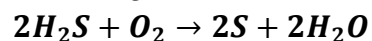


Ecuación 3. *Reacción del hidróxido de hierro con sulfuro.*



Además, es de resaltar que en un ambiente con presencia de oxígeno la reacción general del H_2S pueden implicar la producción de azufre elemental y agua (Torres-Calderón et al., 2020).

Ecuación 4. *Reacción del H_2S con el oxígeno.*



Entre mayor sea la concentración de H_2S y el área de superficial del adsorbente, la corrosión del hierro se llevará a cabo de manera más rápida.

5.4.2.1. Pretratamiento de la lana de acero

Como se mencionó anteriormente, la presencia de ciertos compuestos como óxidos e hidróxidos de hierro promueven una rápida reacción entre la lana de acero y el sulfuro de hidrógeno presente en el biogás, es por esto, que es necesario realizar un pretratamiento a los compuestos de hierro o acero que se emplean en el proceso de adsorción (Torres-Calderón et al., 2020).

5.4.3. Parámetros que afectan la remoción de H_2S

Masa adsorbente. La cantidad de adsorbente está relacionada con la altura y volumen del lecho, el cual estará en contacto directo con el biogás y por consiguiente al sulfuro de hidrógeno e influirá directamente en la transferencia de masa que se lleva a cabo vía adsorción, la capacidad para adsorber un ion metálico está en función de la cantidad de adsorbente utilizada (Moreno, 2014).

Concentración inicial del adsorbato (H_2S). Es un factor importante en el equilibrio de la adsorción. Sin embargo, este es suele ser tomado como un parámetro fijo y está determinado por la cantidad sulfuro de hidrógeno en el biogás generado (Devinny et al.,1999).

Flujo volumétrico. Este parámetro al igual que la masa del adsorbente influye en directamente y en gran medida la transferencia de masa del proceso, que a su vez determina la eficiencia de la remoción.

Altura de la columna. La altura de la columna, así como el diámetro de esta resultan importantes, al tener una mayor altura, se obtienen mejores resultados de remoción de H_2S , esto debido a que es un parámetro que está altamente relacionado a la cantidad de masa que habrá en la columna de lecho fijo y el tiempo de contacto con el contaminante objetivo, así pues, la altura y la masa son parámetros directamente proporcionales (Devinny et al., 1999).

6. Metodología

En este apartado se definió como obtener los lineamientos más importantes para la obtención de los objetivos propuestos (ver figura 3).

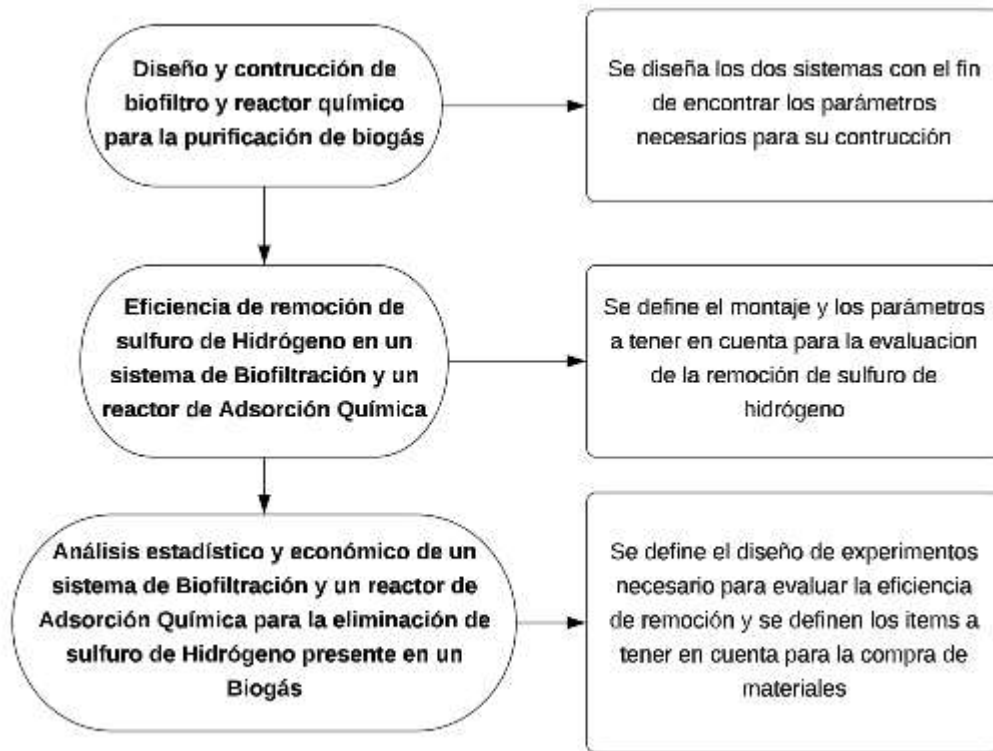


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología (elaboración propia).

6.1. Diseño y construcción de un sistema de biofiltración y de un reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero

El objetivo de esta sección es mostrar procedimientos necesarios tanto del biofiltro como del reactor de adsorción química no regenerativa para el diseño y construcción de estos, como parámetro de diseño se empleó el flujo total de biogás generado en el reactor UASB por unidad de tiempo, esto con el fin de hallar las relaciones de altura y diámetro de las columnas a construir para remover el sulfuro de hidrógeno presente en el biogás generado.

Finalmente, la construcción del biofiltro y del reactor químico constó de una descripción detallada de los materiales a usar y de la forma de ensamble de estos para lograr reactores estables e idóneos para llevar a cabo los objetivos propuestos.

6.1.1. Diseño de biofiltro para la purificación de biogás

El diseño del biofiltro se basó en la relación de altura/diámetro y en la función de tiempo de residencia que para este caso fue de 50 segundos (Fischer, 2010), después de encontrar el volumen necesario para el biofiltro se procedió a encontrar la relación de altura/diámetro más conveniente para el diseño, se define la relación H/D cercana a 10, esto con el fin de mejorar la difusión del sistema y su mantenimiento (Martínez, 2018). La más conveniente por facilidad de operación del reactor (llenado y vaciado). Para ello se evaluarán dos diámetros comerciales de tubos de PVC de 1.5 y de 2 pulgadas, estos diámetros fueron seleccionados debido a que son de fácil acceso y bajo costo (se pueden comprar comercialmente).

Después de hallar la mejor relación evaluando estos dos diámetros, se procedió a calcular la altura del biofiltro para el diámetro específico de tal relación, el 80% de esta altura fue seleccionada como la altura disponible para el material filtrante (compost) y el 20% (Gómez & Roa, 2020) restante para crecimiento de biomasa y control de desechos (fondo del biofiltro). Por último, se diseñó el biofiltro en el programa SOLIDWORKS con las medidas encontradas.

6.1.2. Construcción del biofiltro

En la construcción del biofiltro se emplearon materiales de bajo costo y de fácil acceso, entre ellos: mallas de nylon, tubos de PVC, tapas plásticas, mangueras, compost, entre otros materiales.

Primero se usó la malla como soporte del compost en el biofiltro, para ello se cortó el tubo de PVC que para este punto ya poseía el diámetro descrito de la sección inmediatamente anterior (6.1.1.), esta separación del biofiltro además de sostener el compost generó un espacio adicional en la parte inferior del biofiltro, el cual sirvió para evitar el taponamiento del conducto por donde ingresaba el biogás sin tratar y además de eso para retirar compost residual que se desprendía de la columna de filtración.

6.1.3. Aislamiento de Microorganismos

Para el aislamiento de los microorganismos transformadores de azufre *sulfuretum*, entre ellas los géneros *Acidianus*, *Acidithiobacillus*, *Aquaspirillum*, *Aquifex*, *Bacillus*, *Beggiota*, *Methylobacterium*, *Paracoccus*, *Pseudomonas*, *Starkeya*, *Sulfolobus*, *Thermitiobacillus*, *Thibacillus* y *Xanthobacter* (Friedrich *et al.*, 2001), se realizó una confirmación de presencia en tres agares específicos (Bismuto, TSI y TSC) y luego de verificar la presencia se entabló

un procedimiento para la producción en masa de los microorganismos con el fin de inocular el compost (material filtrante/Soporte) del biofiltro.

Para este procedimiento se definen varios parámetros como:

- Medio Mineral: Tiosulfato de Sodio.
- Fuente de extracción: Lodo superficial
- Suspensión.
- Periodo de cultivo: 48 horas
- Nutrientes: N-P-K y carbonatos.

A continuación, se realizaron los cultivos en envases de 100 ml de capacidad a temperatura ambiente (20°C) pues esta temperatura era a la cuál iba a operar el biofiltro (condiciones ambientales de laboratorio), de la misma forma el pH se mantuvo neutro en el medio para ayudar al crecimiento de este tipo de bacterias y no que no se evidencia un descenso de este como consecuencia de la producción de ciertos compuestos intermediarios en el medio de cultivo que acidificaran la solución.

La presencia de los microorganismos transformadores de azufre se corroboró a través de un método colorimétrico en el cual se evidenciaba una coloración negra en cada uno de los medios empleados, lo cual indica positividad en la presencia de estos. Para el crecimiento e inoculación microbiana se aisló una colonia, la cual se puso en contacto con un medio enriquecido con tiosulfato, esto con el fin de propiciar el crecimiento selectivo de los microorganismos y posteriormente emplear este medio para inocular el material filtrante (compost).

6.1.3.1. Confirmación de Presencia de Microorganismos Sulfooxidantes.

Se usó como fuente de extracción un lodo superficial aeróbico proveniente de una planta de tratamiento de agua residual. Antes de la preparación de toda la prueba de confirmación de presencia de los microorganismos Sulfooxidantes, se esterilizo todos los implementos a utilizar en autoclave (Figura 4).



Figura 4. Esterilización del material requerido para el aislamiento y crecimiento.

Para realizar la **Suspensión** se llevaron a cabo los siguientes pasos.

1. Colocar 10 ml de lodo superficial en 50 ml de solución peptonada.
2. Agitar constantemente por 15 minutos.
3. Reposar la solución durante 15 minutos.
4. Extraer 10 ml del sobrenadante para el medio de cultivo (Figura 5).



Figura 5. Suspensión de microorganismos.

- **Medios De Cultivo Enriquecidos**

Después de tener los 10 ml de muestra proveniente de la suspensión, se agregaron a los medios de cultivos disponibles para esta prueba. Se usaron dos medios de cultivo (ver Tabla 2), los dos enriquecidos con tiosulfato de sodio, el cual será usado como fuente energética para los mismos.

Tabla 2. Medios de Cultivo (elaboración propia).

SOLUCIÓN 1		SOLUCIÓN 2	
Compuesto	Cantidad (g/l)	Compuesto	Cantidad (g/l)
Triple N, P, K	2	Triple N, P, K	1
Carbonato de Calcio	1	Carbonato de Sodio	1
Tiosulfato de Sodio	3	Tiosulfato de Sodio	3
		Sulfito de Sodio	5

Se realizó el ensayo por duplicado y bajo las condiciones de aerobiosis y anaerobiosis (Figura 6).



Figura 6. Agitación constante solución #2.

El periodo de cultivo o de exposición de la muestra al medio de cultivo selectivo fue de 72 horas, esto con el fin de propiciar el crecimiento de los microorganismos transformadores de azufre.

Para verificar la presencia de las bacterias sulfooxidante se emplean tres agares específicos (Tabla 3)(Figura 7):

Tabla 3. Agares de confirmación (elaboración propia).

Agar de Sulfito de Bismuto
Agar TSC (Triptosa-Cicloserina-Sulfito)
Agar TSI (Hierro-triple azúcar)



Figura 7. *Agares de confirmación.*

6.1.3.2. Material Filtrante

Para la elaboración del material filtrante, específicamente compost, se usó la técnica desarrollada por el ingeniero Agrónomo Juan Diego Elijalde y su equipo de trabajo en el aula ambiental del barrio la America-Medellín (Colombia), esta técnica de compostera apanadora se describe a continuación, cabe resaltar que los materiales empleados son económicos y de fácil acceso:

Materiales:

- Compostera Plástica
- Tubo respirador de PVC.
- Cubierta de tela con resorte.
- Tabla para picar y cuchillo.
- Ponchera pequeña.
- Costal tupido

Proceso:

1. Se corta el material dispuesto para la elaboración del compost (materia orgánica, restos de paja, poda de césped y compost maduro) en trozos medianos y pequeños para ayudar a la transferencia de masa (Figura 8), así ocuparán menos espacio en la compostera y se almacenan en un recipiente con tapa.



Figura 8. Corte de material para compost.

2. Se deposita un poco de material seco en la ponchera, se agrega paulatinamente el material cortado y se van cubriendo con más material seco (mezcla de café con aserrín), posteriormente se mezclan y de esta forma irán quedando apanado o sellado el material orgánico o de poda (Figura 9).



Figura 9. Material seco y fino para controlar olor y humedad.

3. El siguiente paso es agregar material seco en la base de la compostera, se ubica un tubo con diferentes aberturas en el centro de la compostera, con el fin de servir como respirador del sistema, se adiciona el material apanado formando una capa de

aproximadamente de 10 cm (Figura 10), se vuelven a cubrir con material seco y se repite esta acción hasta llenar la compostera.



Figura 10. Compostera llena.

4. Para finalizar el llenado se agrega una última capa de material seco (Figura 11) y se tapa la compostera de nuevo.



Figura 11. Disminución de volumen en el proceso de compostaje.

Para evitar malos olores y acelerar la descomposición del material, se realizan volteos cada 8 días por un periodo de 6 semanas, de la siguiente manera:

5. Se retira la tapa de tela y el tubo respirador, se cubre la compostera con un costal tupido y se deposita el material de compostaje allí.
6. Posteriormente se balancea y voltea el material en el costal y se reincorpora el contenido en la compostera ubicando nuevamente el tubo respirador en el centro y cubriéndola con la tapa de tela con un resorte en el borde.



Figura 12. Monitoreo del compost.

El monitoreo finalizó a los 38 días, cuando el compost se encontraba en su estado de maduración antes de ser cosechado (Figura 12).

6.1.4. Diseño del reactor químico de adsorción química no regenerativa con lana de acero para la purificación

Dimensionamiento de la columna de lecho fijo

Para el diseño de la columna de lecho filtrante con lana de acero se tomó en cuenta la relación óptima de altura y diámetro de 10, ello con el fin de evitar caídas de presión y fácil manipulación del lecho a la hora de ejecutar el diseño de experimentos.

6.1.5. Construcción del reactor químico

Después de encontrar las medidas del reactor químico, se cortó el tubo de PVC y se replicaron los primeros pasos descritos en la metodología de la construcción del biofiltro, donde se debía realizar un corte a la columna con el fin de ubicar una malla de aproximadamente 3 mm de espesor (Figura 13), la cual tenía como función separar la columna en dos secciones, una sección para albergar el lecho filtrante (lana de acero) y por

donde se suministró el biogás sin tratar y donde cayeron los residuos de la lana que se desprende del lecho.



Figura 13. Malla de nylon sin nudo de 3 mm.

Para aumentar la eficiencia de la remoción de H_2S en la columna filtrante, fue necesario realizar un pretratamiento a la lana de acero para aumentar la velocidad de reacción entre el acero y el contaminante, este procedimiento consistió en impregnar la lana de acero con ácido clorhídrico al 5% v/v, se esperó 10 min para posteriormente volver a ser impregnada pero ya con NaOH al 5% v/v y por último se dejó en espera por 20 minutos, esto facilitó la oxidación de la lana de acero en poco tiempo (Torres-Calderón et al., 2020).

6.2. Eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno en un sistema de biofiltración y un reactor de adsorción química

Una vez construidos los dos sistemas: biofiltración y reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero como se mostró en la sección 6.1, es necesaria una evaluación técnica de los mismos, por ello esta sección de evaluación de la eficiencia de remoción de H_2S se enfocó en hallar y analizar los porcentajes de remoción de H_2S bajo variaciones de las condiciones operacionales que tienen como objetivo probar experimentalmente el comportamiento de ambos sistemas.

Para concluir sobre este comportamiento, se usan parámetros como la eficiencia de remoción de H_2S máximos y mínimos vinculados a sus propias características operacionales y de capacidades máximas de eliminación, esta última extraída del gráfico de tasa de carga versus capacidad de eliminación y significa el punto a partir del cual el sistema objeto de estudio comienza a presentar inconsistencias en cuanto a remoción de H_2S si se decide aumentar la cantidad de biogás o concentración de este.

Para la evaluación de la eficiencia en la remoción de sulfuro de hidrógeno en los dos sistemas construidos, primero se definió un diseño de experimentos factorial en el cual la variable dependiente o respuesta fue la capacidad de eliminación de sulfuro de hidrógeno y los factores fueron el flujo de biogás que ingresa al sistema y altura/masa de material filtrante. El diseño consideró tres réplicas del experimento y analizó los efectos principales de cada factor, al igual que la interacción entre los niveles evaluados.

El diseño de experimentos para el biofiltro se basó en la respuesta de la eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno (en porcentaje) ante cambios en la altura de la columna filtrante (compost) la cuál irá desde 0,14 a 0,42 m y ante modificaciones del flujo de ingreso del biogás sin tratar, el cual irá desde 27,7 a 85,1 Lh⁻¹, de acuerdo al diseño basado en 50 segundos como tiempo de retención.

Para el reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero tuvo como variable respuesta nuevamente la eficiencia en la remoción de sulfuro de hidrógeno y se estudiará su comportamiento ante cambios en el flujo de biogás sin tratar que entra al sistema que será de 27,7 a 85,1 Lh⁻¹ y en alteraciones de la variable de masa de material adsorbente (lana de acero) que irá desde 10 a 30 gramos de lana de acero.

Para la determinación de la concentración de sulfuro de hidrógeno tanto al inicio del proceso como en el biogás resultante después de la purificación, se utilizó un analizador de gases OPTIMA7 biogás MRU Air fair el cual cuenta con intervalo de trabajo de 0 ppm a 2000 ppm de H₂S y una incertidumbre de 10 ppm de H₂S.

El biogás producido en el reactor de POME es guardado en una bolsa para gases que posee una capacidad de aproximadamente 200 litros, primeramente se le realizó una caracterización inicial a este biogás producido, el biogás restante es usado para los experimentos propuestos, inyectándolo a un rotámetro que ayudará al control del flujo y que está conectado de manera directa al biofiltro o al reactor de adsorción química no regenerativa, una vez, el biogás haya atravesado toda la columna de material filtrante, es de nuevo capturado en una bolsa tedlar de aproximadamente 5 litros de capacidad y fabricadas en Fluoruro de Polivinilo (PVF) de la marca Agilent Technologies; Para adquirir los datos esenciales en el diseño de experimentos, se analizan estas bolsas, el proceso completo se muestra en la figura 14.

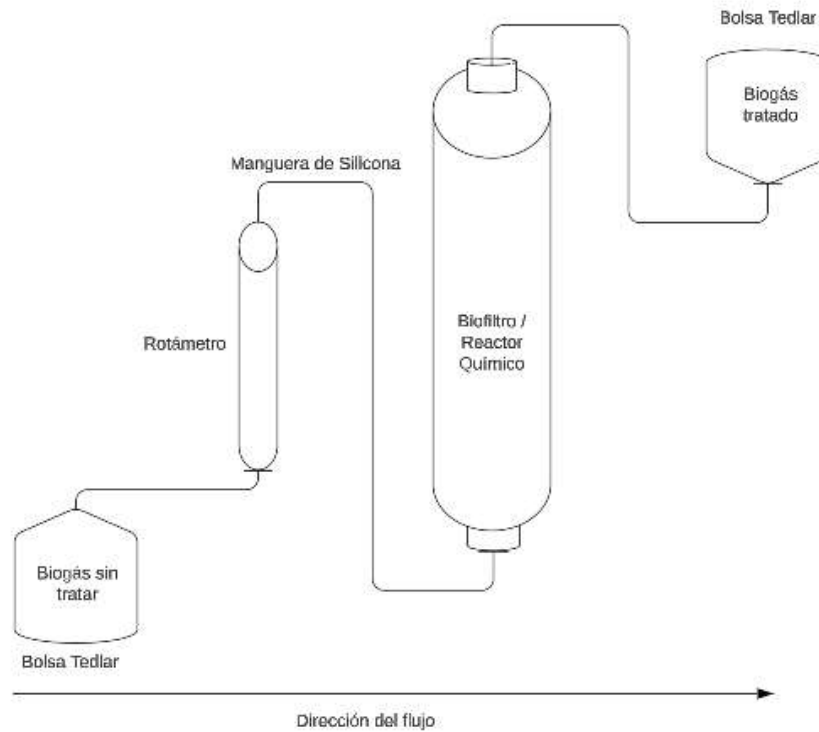


Figura 14. Esquema de remoción de sulfuro de hidrógeno (elaboración propia)

Posteriormente, se hallaron los siguientes marcadores tradicionales (ecuaciones 5,6,7 y 8):

Ecuación 5. Eficiencia máxima de remoción de sulfuro de hidrógeno para cada sistema.

$$ER = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} * 100; \text{ valor máximo registrado}$$

Ecuación 6. Eficiencia mínima de remoción de sulfuro de hidrógeno para los dos sistemas.

$$ER = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} * 100; \text{ valor mínimo registrado}$$

Ecuación 7. Tasa de carga.

$$TC = \frac{Q}{V} * C_{in}$$

Ecuación 8. Capacidad de eliminación máxima.

$$CE = \frac{Q}{V} * (C_{in} - C_{out})$$

Donde:

C_{in} = concentración del biogás que ingresa (partes por millón).

C_{out} = concentración del biogás que sale (partes por millón).

Q = Flujo de biogás (Lh^{-1}).

V = Volumen Útil (m^3).

Siendo la capacidad de eliminación crítica expresada de una manera aproximada, ya que se extrajo de la gráfica suministrada por la tasa de carga y la capacidad de eliminación tanto para el biofiltro como para el reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero.

6.3. Análisis estadístico y económico de un sistema de biofiltración y un reactor de adsorción química para la eliminación de sulfuro de hidrógeno presente en un biogás

6.3.1. Análisis de la información

Para el análisis de información se consideró como variable dependiente (respuesta) la eficiencia en la remoción de H_2S y factores masa de la lana de acero y flujo de biogás que entra al sistema para el reactor de adsorción química, mientras que para el biofiltro se emplearon como factores la altura de la columna (compost) y el flujo de ingreso de biogás.

Debido a que la eficiencia de remoción no cumplió con el supuesto de normalidad, obteniéndose valores P inferiores a 0,05, se llevó a cabo un análisis de varianza no paramétrico unifactorial de Kruskal-Wallis, considerando un nivel de significancia de 0,05. Posterior al análisis de varianza y la determinación de diferencias estadísticamente significativas se llevó a cabo una prueba post-hoc no paramétrica de Pairwise.Willcox y, además, se realizó una representación gráfica de la interacción entre los factores, considerando el valor medio de la respuesta.

6.3.2. Análisis económico

Para el análisis económico se recopilaron los precios de los materiales de construcción tanto para el biofiltro como para el reactor de adsorción química de 3 proveedores diferentes, discriminando precios más bajos y precios más altos en pesos colombianos.

De igual forma se analizó el apartado de accesibilidad de los materiales y los costos adicionales asociados a la construcción de los sistemas, ya que operacionalmente la reacción de remoción de sulfuro de hidrógeno se desarrolla de manera espontánea. Lo anterior permitiría concluir cuál de las dos tecnologías tuvo mayores costos asociados a la construcción, esto sujeto a las prestaciones de remoción de sulfuro de hidrógeno.

7. Resultados y discusión

7.1. Diseño de biofiltro para la purificación

Para el diseño del biofiltro se tuvo en cuenta los diámetros comerciales de los materiales a emplear en la misma, en este caso se realizaron los cálculos con un tubo de PVC de 1,5 Pulgadas y de 2 pulgadas. Además, se tomó un flujo mínimo de entrada al reactor y cuando se halló la relación adecuada entre la altura y el diámetro de este, se procedió a escalar el reactor a un flujo más grande; para este caso, el diseño se inicia con un flujo de 30 Lh^{-1} o sea $0,03 \text{ m}^3/\text{h}$.

$$Tr = \frac{v}{Q},$$

Donde Tr es el tiempo de residencia del gas en el biofiltro, el cual según Fischer (2010) varía entre 40 y 60 segundos, v es el volumen del reactor y Q es el caudal que le ingresa al reactor. Entonces:

$$50 \text{ s} = \frac{v}{8,33 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}},$$

Se decide tomar un tiempo de residencia intermedio entre los reportados en la literatura de 50 segundos (Fischer, 2010).

$v = 416,5 \text{ cm}^3$

Después de encontrar el volumen del reactor, se procede a hallar la altura (H) de este.

$$v = \frac{\pi (D)^2}{4} H,$$

Donde D es el diámetro del reactor (en este caso de 1.5 y 2 pulgadas). Para 1.5 pulgadas o 3.81 cm de diámetro.

$$416,5 \text{ cm}^3 = \frac{\pi (3,81 \text{ cm})^2}{4} H$$

$$H = \frac{(416,5 \text{ cm}^3)(4)}{\pi (3,81 \text{ cm})^2} = 36,531 \text{ cm}$$

Para 2 pulgadas o 5,08 cm de diámetro.

$$416,5 \text{ cm}^3 = \frac{\pi (5,08 \text{ cm})^2}{4} H$$

$$H = \frac{(416,5 \text{ cm}^3)(4)}{\pi (5,08 \text{ cm})^2} = 20,5493 \text{ cm}$$

Se desea obtener una relación de altura y diámetro (H/D) aproximada a 10, entonces:

- Para 1,5 pulgadas o 3,81 cm de diámetro.

$$\frac{36,531 \text{ cm}}{3,81 \text{ material cm}} = 9,5881$$

- Para 2 pulgadas o 5,08 cm de diámetro.

$$\frac{20,5493 \text{ cm}}{5,08 \text{ cm}} = 4,045$$

Según lo expresado anteriormente, el diámetro que presenta una mejor relación con su altura para la construcción del biofiltro es el diámetro de 1.5 pulgadas.

A continuación, se procede al escalado para el diámetro de 1.5 pulgadas.

Para el escalamiento se elige un volumen de 0,09 m³/h o 90 Lh⁻¹, el cual es la producción promedio de biogás generado en el reactor UASB que trabaja con POME, de ser el caso, y se requiera un volumen mayor, se realiza el mismo procedimiento descrito.

Para 1.5 pulgadas o 3.81 cm de diámetro.

$$Tr = \frac{v}{Q} = 50 \text{ s} = \frac{v}{25 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}}$$

$v = 1250 \text{ cm}^3$

Se procede a calcular de nuevo el diámetro y la altura necesaria para tratar el volumen de gas antes mencionado, teniendo en cuenta la relación H/D que se encontró con un diámetro de 1,5 pulgadas.

$$1250 \text{ cm}^3 = \frac{\pi (D)^2}{4} \cdot (9,5881)D$$

D= 5,49 cm
H= 5,4957*9,5881
H= 52,7 cm

Se procede realizar los planos del biofiltro con las especificaciones halladas usando el programa SOLIDWORKS (Figura 15).

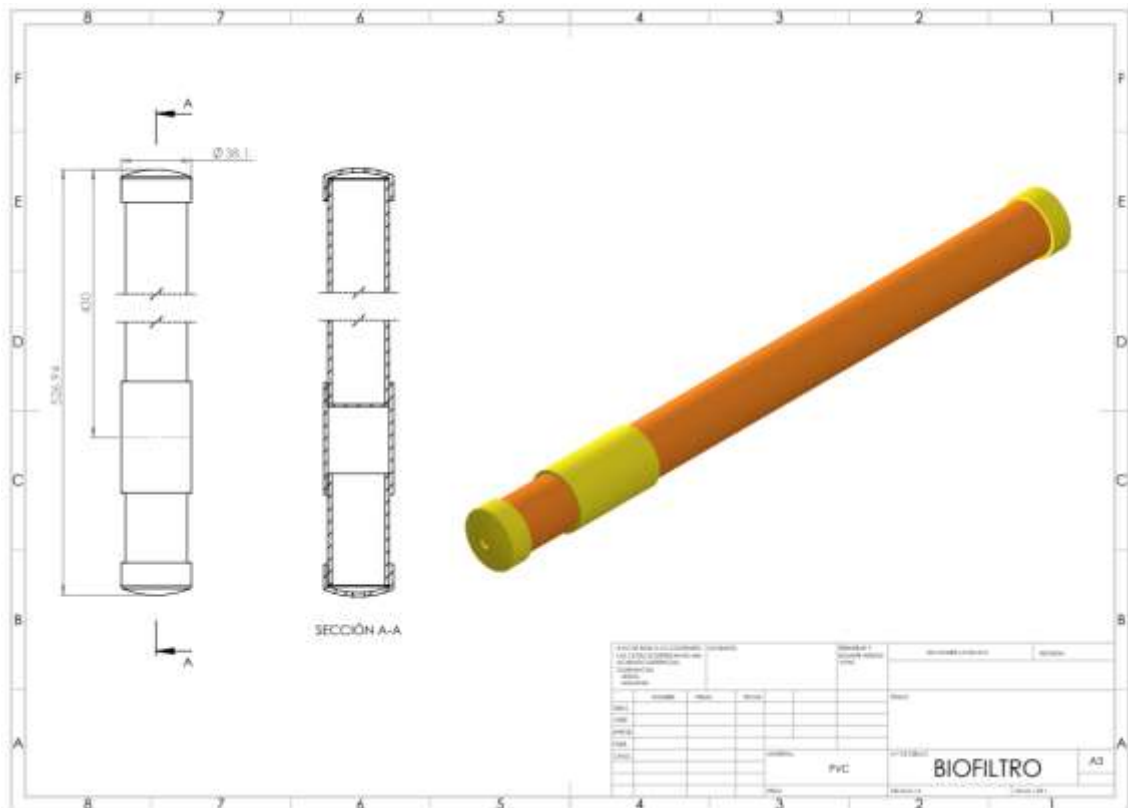


Figura 15. Diseño del biofiltro en SOLIDWORKS.

7.1.1. Construcción del biofiltro

Como se mencionó anteriormente esta construcción junto a la del reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero se ejecutó con materiales de bajo costo, el soporte usado para sostener el material filtrante (compost) se usó una malla en nylon. Después se dispuso la malla dentro del tubo de PVC, con el fin de servir de soporte para el compost (Figura 16).



Figura 16. *Ensamble del biofiltro con malla.*

Aproximadamente el 80% del reactor se llenó con el material, esto con el fin de tener espacio suficiente disponible para la generación de nueva biomasa y para la recolección de material que cae a través del soporte de nylon.

Una vez finalizado el proceso de compostaje a los 38 días, se obtuvieron los valores de los 4 parámetros fisicoquímicos, dos cualitativos: humedad, luminosidad y dos cuantitativos como son el pH y la temperatura (Figura 17), adicional a esto se realiza la prueba de puño para verificar la humedad del sistema.

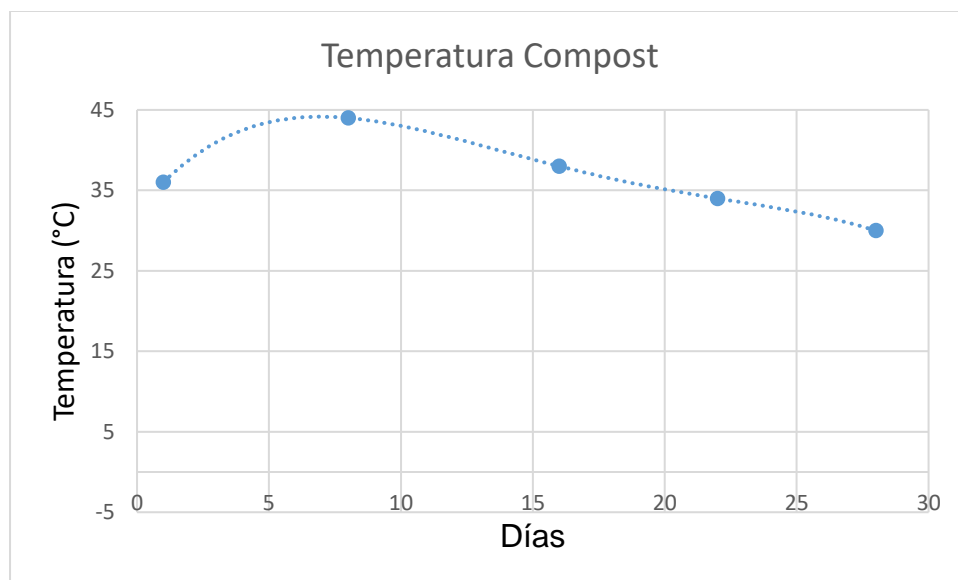


Figura 17. *Seguimiento de la temperatura del compost (elaboración propia).*

En promedio el compost tuvo un pH de 6, una luminosidad baja y una humedad apropiada después de realizar la prueba del puño (Figura 18).



Figura 18. Material filtrante (Compost).

7.1.1.1. Aislamiento y crecimiento microbiano.

Después de preparar los agares de confirmación y medios de cultivo a evaluar (Figura 19), se procede a verificar la presencia de microorganismos en una placa de Petri por el método de vertido en profundidad llevando un 1 ml de muestra al fondo de la caja y vertiendo entre 20 y 25 ml del medio de cultivo a una temperatura aproximada de 40°C. Por último, en este proceso se emplea un tiempo de incubación de 24 horas a una temperatura de 36°C tanto el ensayo de anaerobiosis y aerobiosis (Figura 20), para posteriormente observar la formación de colonias de las bacterias.



Figura 19. Preparación prueba de confirmación.



Figura 20. Jarras de anaerobiosis con los dos agares de confirmación.

En los tres agares selectivos empleados para el aislamiento e identificación Sulfito de Bismuto, TSI (Hierro Triple Azúcar) y TSC (Triptosa Cicloserina Sulfito) se evidencia una coloración negra cuando hay presencia de colonias de microorganismos transformadores de azufre (Figura 21).

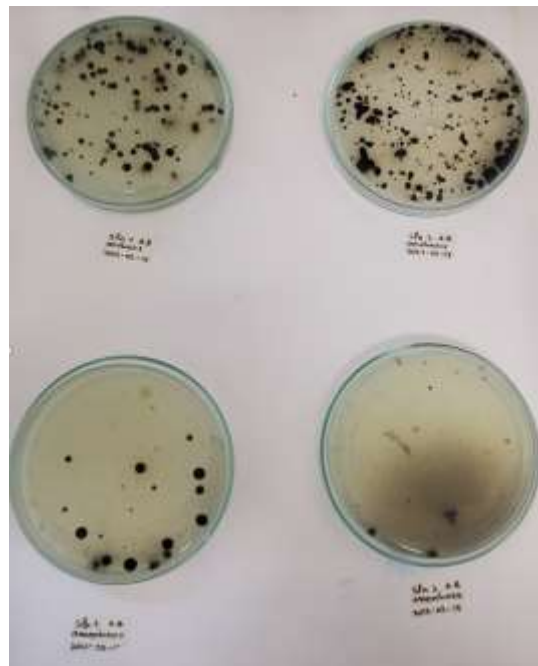


Figura 21. Confirmación de la presencia de bacterias sulfooxidantes en agar de Bismuto con aerobiosis (ensayos superiores) y anaerobiosis (ensayos inferiores).

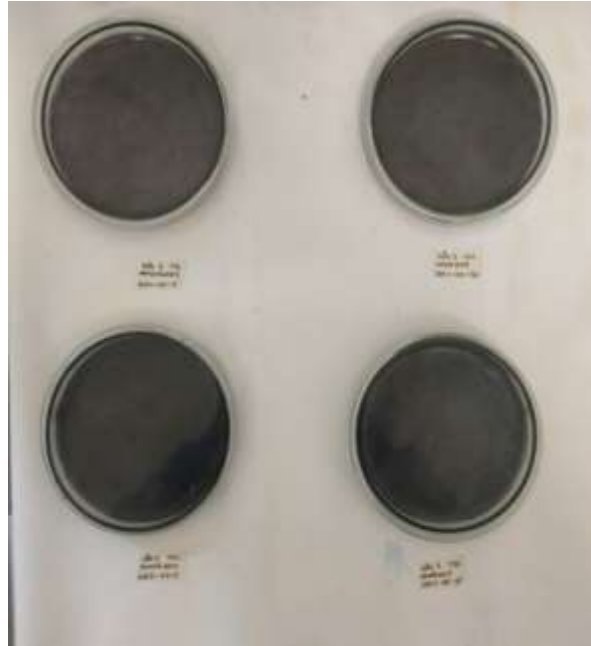


Figura 22. Confirmación de la presencia de bacterias sulfooxidantes en agar TSC con aerobiosis (ensayos superiores) y anaerobiosis (ensayos inferiores).

Como se observa en las Figuras 21 y 22, se concluye la existencia de microorganismos sulfooxidantes.

De igual manera se puede evidenciar en las imágenes, la mejor condición para el aislamiento es el procedimiento que se desarrolló en presencia de oxígeno (los ensayos superiores en las imágenes), ya que la coloración negra es evidencia de la presencia de microorganismos sulfooxidantes (Harmon et al., 1971; Labbe, 1983).

7.1.1.2. Crecimiento Microbiano

Después de confirmar la presencia de las bacterias transformadoras de azufre se procede a realizar una producción en masa de estas, ello con el fin de tener a disposición muchos individuos para inocular el medio filtrante (compost) del biofiltro.

Se preparó de nuevo la solución #2 que se encuentra descrita en la Tabla 2, empleada en la confirmación de presencia, pero con el doble de concentración de todos los compuestos que la forman, posteriormente se inoculó esta nueva solución con las colonias observadas y se esperó por 72 horas, esto con el único objetivo de proporcionar individuos capaces de transformar el sulfuro de hidrógeno y acondicionar más rápido el compost.

7.2. Diseño y construcción del reactor químico para la purificación

Para el dimensionamiento de la columna de lecho fijo con lana de acero es de suma importancia la relación de la altura del lecho/ diámetro de la columna, se sugiere que tal relación no debe ser menor a 10, debido a que estructuras alargadas favorecen la interacción entre el biogás y el material adsorbente (lana de acero). Sin embargo, relaciones demasiado grandes producen caídas de presión mayores, además presentar inconvenientes en el mantenimiento y cambio del lecho (Martinez, 2018).

Ecuación 9. *Relación optima de altura/diámetro*

$$\frac{Z}{\emptyset} = 10$$

Al usar tubos de PVC con diámetro de 1,5 pulgadas (3,81 cm) obtenemos un Z de 38,1 cm. Es importante tener un espacio disponible entre el lecho y la parte superior e inferior de la columna (drenaje), además, el reactor debe contar con un espacio suficiente (20%) (Gómez & Roa, 2020). para retirar el material que no queda suspendido en la malla (Biomasa), de tal forma la altura de la columna seria:

Ecuación 10. *Altura de la columna*

$$H=1,2* Z.$$

Entonces la altura de la columna es de 46 cm para un tubo de PVC de 1,5 pulgadas de diámetro.

De igual manera que el biofiltro, en este punto del diseño se procede a esquematizar el reactor de adsorción química con lana de acero en el programa SOLIDWORKS (Figura 23), obteniendo así las siguientes dimensiones.

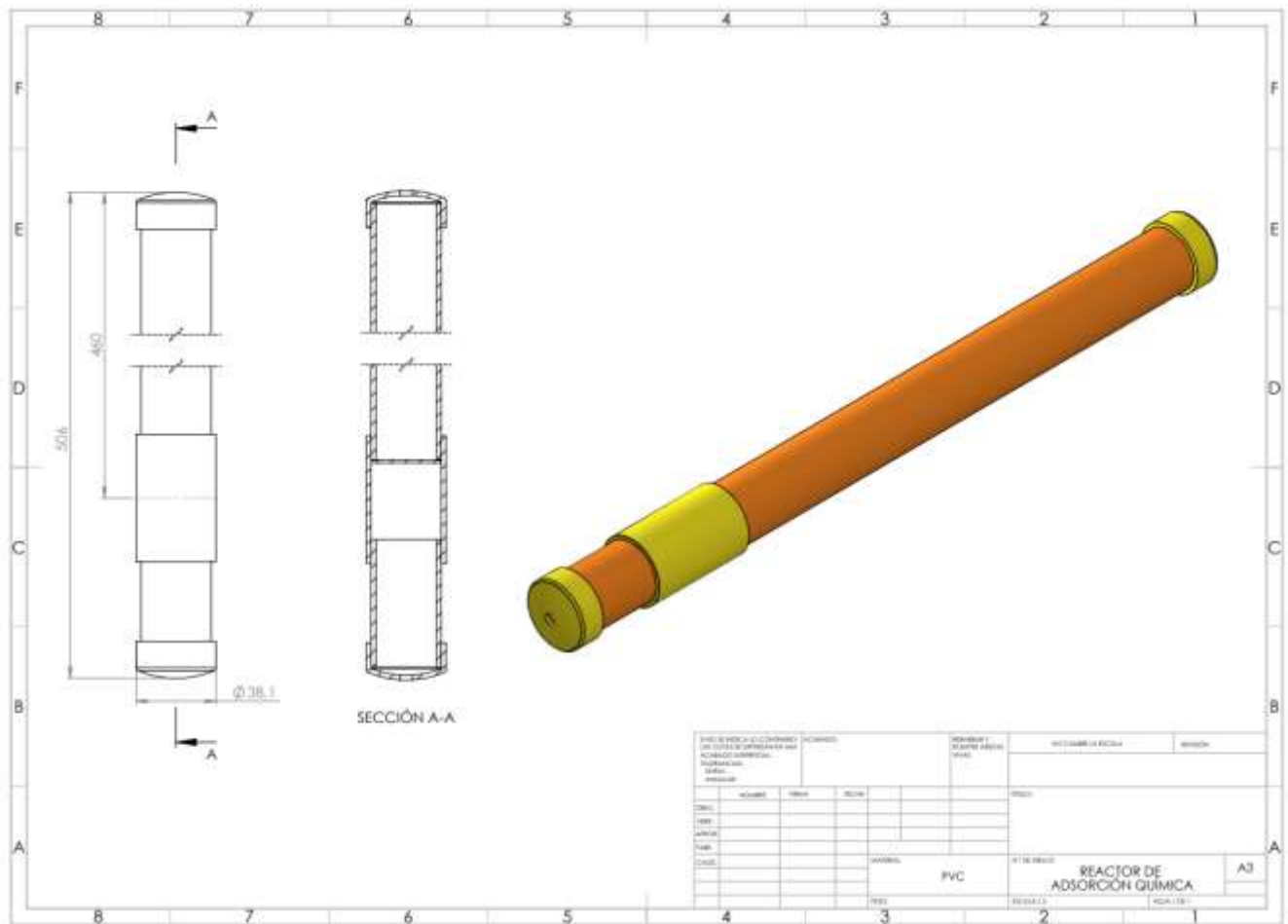


Figura 23. Diseño del reactor de adsorción química con lana de acero en SOLIDWORKS.

Para su fabricación fue suficiente el tubo de PVC de 1,5 pulgadas de diámetro y dos tapas de plástico para los extremos del reactor.

El pretratamiento de la lana de acero se realizó con la ayuda de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio, ambas soluciones al 5% V/V, esto ayudó a oxidar de una manera eficiente en cuestión de minutos las lanas de acero. Este proceso consistió en esparcir HCl sobre la lana de acero, dejando reposar a temperatura ambiente por 10 minutos y luego se agregó con un aspersor NaOH, dejando reposar nuevamente durante 10 (Figura 24) (Torres-Calderón et al.,2020).

A continuación, se muestra la comparación entre la lana de acero comercial y la lana de acero pretratada, observando un cambio de color asociado al estado oxidado de la misma.



Figura 24. Lana comercial (parte superior) vs Lana oxidada (parte inferior).

7.2.1. Diseño y construcción

Se pudo usar de manera satisfactoria materiales de fácil acceso y de bajo costo para la construcción a medida del biofiltro y del reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero. Los datos hallados en el diseño y empleados en la construcción para los dos sistemas se recopilaron en la tabla 4:

Tabla 4. Datos de diseño para un tiempo de retención de 50 segundos (elaboración propia).

	Diámetro de la columna (cm)	Altura de columna (cm)	Materiales usados
Biofiltro (Figura 26)	3,81	52,7	Tubo PVC (55 CM) Tapas Entrada/salida Silicona Manguera Compost
Reactor de adsorción química (Figura 27)	3,81	46	Tubo PVC (50 CM) Tapas Entrada/salida Silicona Manguera Lana de acero

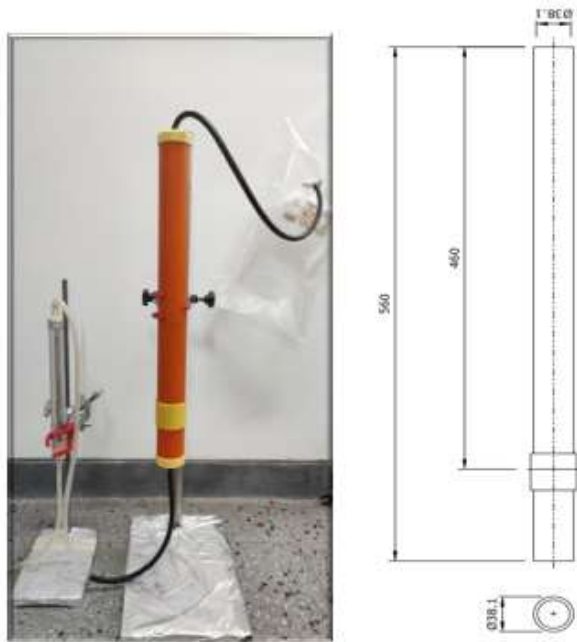


Figura 25. Reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero (medidas en mm).

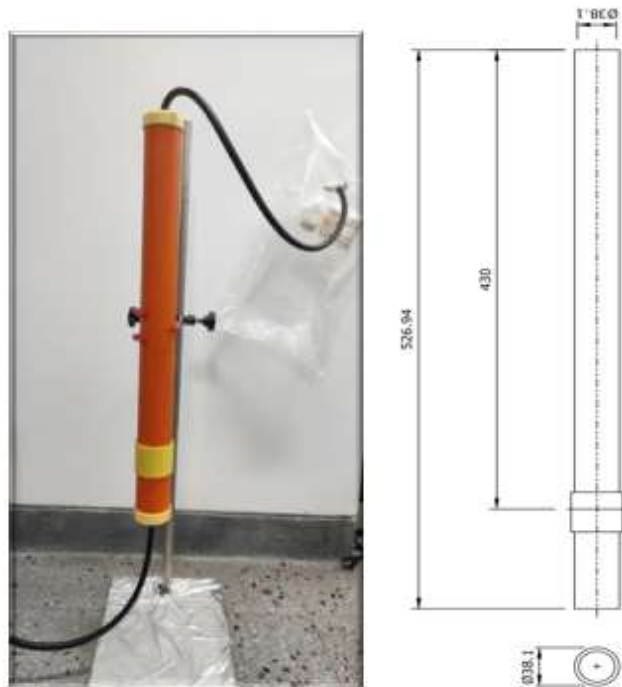


Figura 26. Biofiltro (medidas en mm).

7.3. Eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno en un sistema de biofiltración y un reactor de adsorción química

Una vez contruidos los dos sistemas: biofiltro y reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero como se mostró en la sección anterior, es necesaria una evaluación técnica de los mismos, por ello esta sección de evaluación de la eficiencia de remoción de H₂S se enfocó en hallar y analizar los porcentajes de remoción de H₂S bajo ciertas condiciones operacionales que tienen como objetivo comprobar el comportamiento de ambos sistemas.

Para concluir sobre este comportamiento, se usan marcadores como la eficiencia de remoción de H₂S máximos y mínimos vinculados a sus propias características operacionales y de capacidades máximas de eliminación, esta última extraída del gráfico de tasa de carga versus capacidad de eliminación y significa el punto a partir del cual el sistema objeto de estudio comienza a presentar inconsistencias en cuanto a remoción de H₂S si se decide aumentar la cantidad de biogás o concentración de este.

7.3.1. Evaluación de la eficiencia de remoción del biofiltro

Todos los experimentos se realizaron en condiciones ambientales laboratorio entonces tanto la temperatura como la presión se consideraron como parámetros fijos a condiciones ambientales (0,998 atm de presión y 23° C).

Por otra parte, los parámetros a evaluar en la eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno en el biofiltro fueron el flujo de biogás que ingresaba al sistema y altura del compost, ya que son variables importantes a tener en cuenta porque están relacionadas directamente con la cantidad de contaminante removido, la variable respuesta o dependiente, en este caso, es la concentración de sulfuro de hidrógeno medido después de atravesar la columna de lecho material filtrante, que se deriva en el porcentaje de remoción de sulfuro de hidrógeno, como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Variables del diseño de experimentos (elaboración propia).

Variable	Tipo	Intervalo
Flujo de biogás (L/min)	Independiente	27,7-85,1 Lh ⁻¹
% Remoción	Dependiente	N.A
Altura del material filtrante (m)	Independiente	0,14 – 0,42 m

Después de definir las variables a tener en cuenta y el tipo, se plantea la hipótesis nula: “**El flujo de biogás que ingresa a la columna de material filtrante no afecta significativamente el porcentaje de remoción de sulfuro de hidrógeno**” (Tabla 6).

Tabla 6. Factores y Niveles del diseño de experimento (elaboración propia).

Factor	niveles
Flujo de biogás (Lh ⁻¹)	27,7 – 55 - 85,1 Lh ⁻¹
Altura del material filtrante (m)	0,14 – 0,28 – 0,42 m

En la tabla 7 se presenta el diseño de experimentos propuesto para el biofiltro, basado en la altura del material filtrante (compost) y el flujo de biogás.

Tabla 7. Diseño de experimentos Biofiltro (elaboración propia).

	Altura del material filtrante (m)	Flujo de Biogás (L h⁻¹)	% Remoción De H₂S
1	0,14	27,7	74,6
2	0,14	55	60,7
3	0,14	85,1	43,2
4	0,28	27,7	84,1
5	0,28	55	73,7
6	0,28	85,1	67,1
7	0,42	27,7	90,9
8	0,42	55	84,0
9	0,42	85,1	78,6

Cabe resaltar que se realizaron 3 réplicas por combinación propuesta, sumando así 27 ensayos. Con los datos obtenidos en el diseño de experimentos se traza la gráfica de tasa de carga vs capacidad de eliminación, dando como resultado la siguiente gráfica:

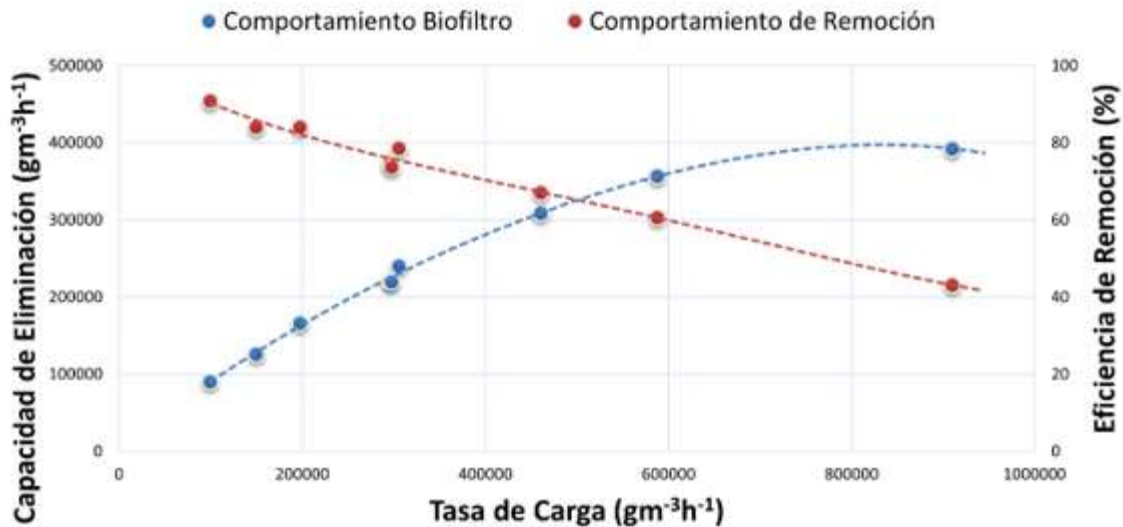


Figura 27. Gráfica tasa de carga vs capacidad de eliminación para el biofiltro (elaboración propia).

Según la figura 27 y los marcadores evaluados en el biofiltro tenemos que la capacidad de eliminación máxima es $392.604,8 \text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ para una tasa de carga de $909.620,2 \text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ lo que equivale a la capacidad de eliminación máxima de sulfuro de hidrógeno para un flujo de biogás de $85,1 \text{ Lh}^{-1}$ y una altura de material filtrante (compost) de 0,14 metros, a partir de este punto el comportamiento del biofiltro empieza a decrecer en cuanto a la remoción de sulfuro de hidrógeno.

El biofiltro tuvo una remoción máxima de sulfuro de hidrógeno de 90,9% aproximadamente para las condiciones de 0,42 m de altura de material filtrante y $27,7 \text{ Lh}^{-1}$. la remoción mínima de sulfuro de hidrógeno para las condiciones evaluadas de 43,2%, este porcentaje de remoción se obtiene cuando se emplea el mínimo de material filtrante (0,14 m) y el máximo flujo evaluado de $85,1 \text{ Lh}^{-1}$.

Estos datos son relevantes a la hora de observar la sensibilidad ante los cambios efectuados en la ejecución del diseño de experimentos, el biofiltro presenta una sensibilidad muy marcada ante los cambios efectuados en las condiciones operacionales, ya que la eficiencia máxima de remoción tiene un descenso de 47.7 puntos porcentuales cuando se expone el biofiltro a condiciones donde no es posible tener una respuesta adecuada de los microorganismos ($85,1 \text{ Lh}^{-1}$ como flujo de biogás) y la mayoría del biogás que atraviesa la columna no se procesa (no hay eliminación de H_2S).

Adicionalmente, en el proceso de **saturación** del biofiltro, cuando es expuesto a altas cantidades de sulfuro de hidrógeno, se emplearon 17 gramos de compost y con el objetivo de disminuir la capacidad de adsorción o eliminación de H_2S a un 12,68% se necesitaron 42

litros de biogás con una concentración inicial de 568 ppm de sulfuro de hidrógeno, dando como resultado una eliminación aproximada de 0,28 gramos de H₂S removido por gramo de compost inoculado usado en el proceso de biofiltración.

La eficiencia obtenida en la remoción de sulfuro de hidrógeno por el biofiltro construido va acorde a las eficiencias obtenidas por otros autores, como es el caso de Aita et al. (2016) quien en la ejecución de su trabajo logra un $75 \pm 13\%$ aproximadamente de remoción de H₂S en el proceso de biofiltración asistido por microorganismos, usando una columna de 100 cm de altura total, con 50 cm de lecho y un flujo de gas $0.0197 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, de igual manera Yang & Allen (2012) han observado que los sistemas de biofiltración que contienen varios tipos de compost de residuos de jardinería como material filtrante eliminan el sulfuro de hidrógeno con eficiencias superiores al 99% para concentraciones de entrada de H₂S en el rango de 5 a 2650 ppmv.

7.3.2. Evaluación de la eficiencia de remoción del reactor químico con lana de acero

7.3.2.1. Diseño de experimentos

Todo el experimento se realizó en condiciones ambientales entonces tanto la temperatura como la presión se van a considerar como parámetros fijos a condiciones ambientales (presión atmosférica de 0,998 atm y temperatura de 23°C).

Por otra parte, la altura de la columna está directamente vinculada a la masa del adsorbente usado, por consiguiente, los factores a evaluar son el flujo de biogás que ingresa al reactor y la masa de lana de acero usada para tratar la cantidad de biogás que ingresa, ya que son variables importantes a tener en cuenta como se mencionó anteriormente, la variable respuesta o dependiente, en este caso, es la concentración de sulfuro de hidrógeno medido antes y después de atravesar la columna de lecho fijo, que se deriva en el porcentaje de remoción de sulfuro de hidrógeno (Tabla 8).

Tabla 8. Variables del diseño de experimentos (elaboración propia).

Variable	Tipo	Intervalo
Flujo de biogás (L/min)	Independiente	27,7-85,1 Lh ⁻¹
% Remoción	Dependiente	N.A
Masa de Lana de acero	Independiente	10- 30 g

Después de definir las variables a tener en cuenta y el tipo de las mismas podemos plantear la hipótesis nula de este caso, la cual es **“El flujo de biogás que ingresa a la columna de adsorción no afecta significativamente el % de remoción de sulfuro de hidrógeno “**. Para este diseño se contemplaron 2 factores experimentales, cada uno de ellos con 3 niveles,

todos ellos enfocados a modificar el comportamiento de la variable respuesta (% de eficiencia en la remoción de sulfuro de hidrógeno) (Tabla 9).

Tabla 9. Factores y niveles del diseño de experimento (elaboración propia).

Factor	niveles
Flujo de biogás (Lh ⁻¹)	27,7 – 55 – 85,1 Lh ⁻¹
Masa de Lana de acero (g)	10,20 y 30 gramos

Una vez realizado cada ensayo, se recopiló el biogás tratado en una bolsa tedlar, la cual posteriormente fue conectada al analizador de gases y así poder saber la concentración final de sulfuro de hidrógeno.

Para cada combinación tenemos la siguiente remoción promedio (Tabla 10).

Tabla 10. Diseño de experimentos reactor químico (elaboración propia).

	Masa de Adsorbente (g)	Flujo de Biogás (Lh⁻¹)	% Remoción H₂S promedio
1	10	27,7	98,8
2	10	55	97,1
3	10	85,1	89,5
4	20	27,7	99,4
5	20	55	99
6	20	85,1	98,1
7	30	27,7	99,7
8	30	55	99,4
9	30	85,1	99,1

Realizando la gráfica de tasa de carga versus capacidad de eliminación, se obtiene:

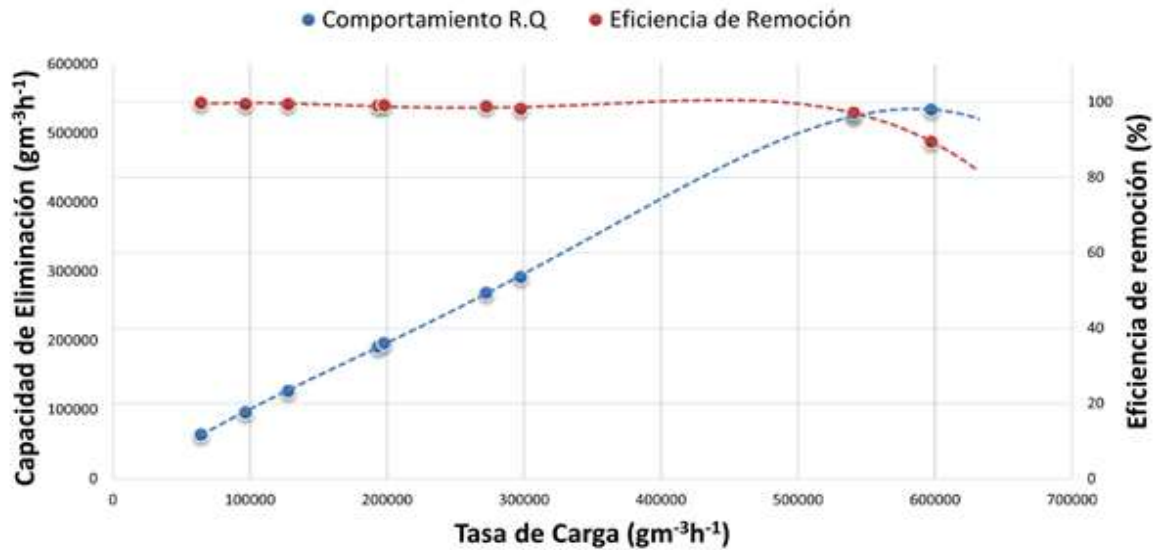


Figura 28. Gráfica de tasa de carga vs capacidad de eliminación del reactor de adsorción química.

Según la gráfica 28 y los marcadores evaluados en el reactor de adsorción química no regenerativa tenemos que la capacidad de eliminación máxima es $534.234,4 \text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ para una tasa de carga de $597.334,2 \text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ lo que equivale a la capacidad de eliminación máxima de sulfuro de hidrógeno para un flujo de biogás de $85,1 \text{ Lh}^{-1}$ y una masa de adsorbente de 30 gramos.

El reactor de adsorción química con lana de acero tuvo una remoción máxima de sulfuro de hidrógeno de 99,7% aproximadamente y una remoción mínima para las condiciones evaluadas de 89,5% en condiciones de capacidad de eliminación máxima, a partir de este punto el comportamiento del reactor empieza a tener un comportamiento decreciente en cuanto a la remoción de sulfuro de hidrógeno.

Estos datos son relevantes a la hora de observar la sensibilidad ante los cambios efectuados en la ejecución del diseño factorial de experimentos, a diferencia del biofiltro, se requiere más contaminante bajo las condiciones evaluadas para que la eficiencia del reactor de adsorción empiece a tener inconvenientes y disminución progresiva de la remoción de sulfuro de hidrógeno.

Como estudio adicional, se analizó el proceso de **saturación** de la lana de acero cuando es expuesta a altas cantidades de sulfuro de hidrógeno, se emplearon 0,6936 gramos de lana de acero y con el objetivo de disminuir la capacidad de adsorción o eliminación de H_2S a un 18,6% se necesitaron 69 litros de biogás con una concentración inicial de 399 ppm de sulfuro

de hidrógeno, dando como resultado una eliminación aproximada de 14,82 gramos de H₂S removido por gramo de lana de acero usada en el proceso de remoción.

Ante las modificaciones efectuadas en las variables operacionales, la respuesta del reactor de adsorción química fue de un 10,2% en cuanto a la disminución de sulfuro de hidrógeno, lo que nos lleva a pensar que, el reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero es estable.

La eficiencia obtenida en la remoción de sulfuro de hidrógeno por el reactor de adsorción química construido va acorde a las eficiencias obtenidas por otros autores, como es el caso de Torres-Calderón, Paucar-Palomino y Pampa-Quispe (2020). quien en la ejecución de su trabajo, diseñaron y construyeron dos torres de lecho fijo con una altura de 37 cm, y 10,2 cm de diámetro ambas, para tal diseño se consideró 111,6 Lh⁻¹ de biogás, su operación fue a temperatura ambiente (19°C) y concentración máxima del sulfuro de hidrógeno de 180 ppm, alcanzó un 99,58% de remoción de H₂S haciendo uso de virutas de hierro pretratadas con peróxido de hidrógeno y cloruro de sodio, de igual manera para el lecho fijo #2 y bajo las mismas condiciones de operación logró un 94,79% de remoción pero en este caso usando ácido clorhídrico e hidróxido de sodio para el pretratamiento de las virutas, de igual manera Riyadi, Kristanto & Pradi (2015) lograron un 97% de eficiencia de remoción en su trabajo usando lana de acero en una columna de PVC de 2 pulgadas de diámetro y 100 cm de diámetro. .

7.4. análisis estadístico y económico de un sistema de biofiltración y un reactor de adsorción química para la eliminación de sulfuro de hidrógeno presente en un biogás

Este objetivo busca generar información más concreta sobre la verdadera interacción entre las condiciones operacionales analizadas tanto para el biofiltro como para el reactor de adsorción química no regenerativa, esta información es analizada bajo un contexto estadístico, encontrando diferencias, similitudes y comportamientos propios de ciertas variables cuando confabulan con otra. En el apartado del análisis económico de construcción se presenta una visión más general de precios de materiales asociados a la construcción de ambos sistemas, destacando precios mínimos aportados por 3 proveedores de materiales de construcción y su accesibilidad.

Finalmente, se realizó una comparación entre la eficiencia de remoción de H₂S aportada por cada sistema y su costo de construcción asociado a estos.

7.4.1. Análisis estadístico y económico del biofiltro

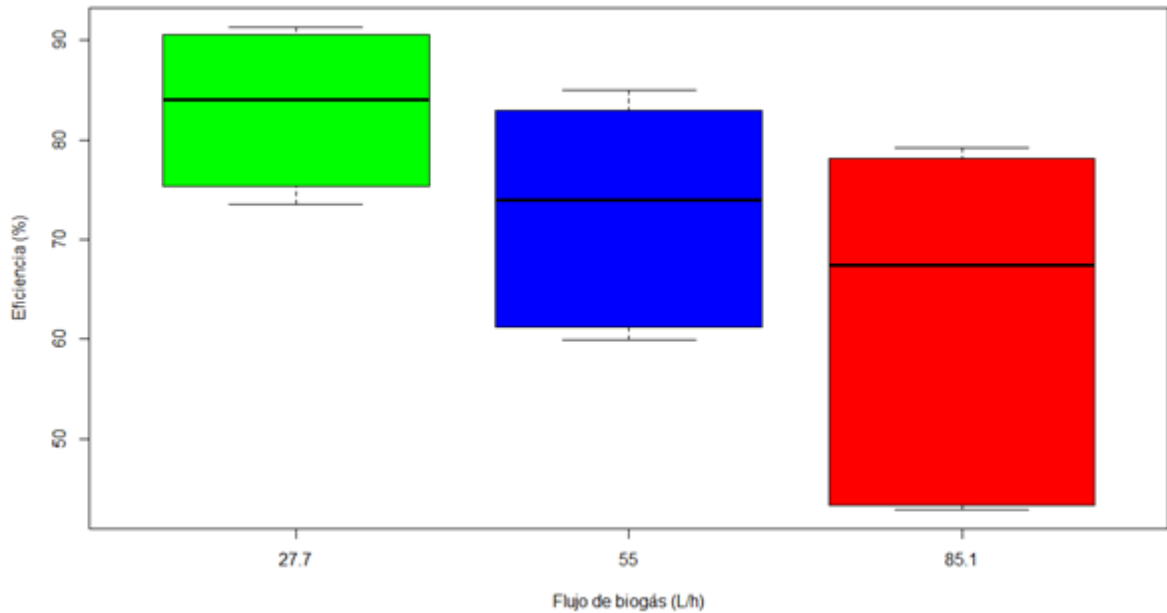


Figura 29. Diagrama de Cajas de Eficiencia vs flujo de biogás.

Según la gráfica 29, la eficiencia más alta de remoción de sulfuro de hidrógeno en el biofiltro se registra cuando se hace pasar a través de él el flujo de biogás más bajo analizado ($27,7 \text{ Lh}^{-1}$), dándole el tiempo suficiente a los microorganismos y al material filtrante de actuar y remover el H_2S del biogás.

Además, se puede observar que los tres flujos analizados presentan una superposición, luego no hay evidencias suficientes para inferir diferencia entre las medias de las respectivas alturas del medio filtrante del biofiltro, aunque el flujo de biogás de $85,1 \text{ Lh}^{-1}$ presenta mayor dispersión de los datos recopilados y menor eficiencia de remoción, esto en contraste a lo antes mencionado, el flujo es lo suficientemente alto como para evitar que todo el sulfuro de hidrógeno sea removido del biogás.

Realizando el mismo procedimiento para los datos obtenidos en la eficiencia de remoción lograda con respecto a las alturas del material filtrante usadas, se obtiene el diagrama número 30.

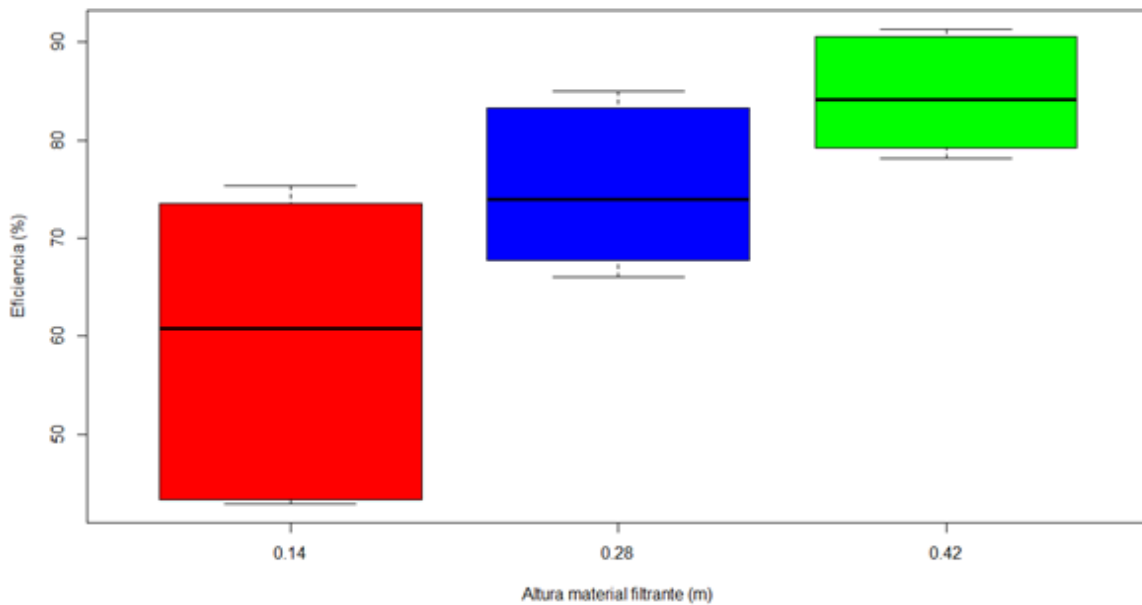


Figura 30. Diagrama de Cajas de Eficiencia vs Altura material filtrante.

Se puede observar que la altura de 0,14 m además de reportar la menor eficiencia, presenta la mayor variabilidad de datos, esto debido a que la cantidad de material filtrante (compost) no es capaz de remover altas cantidades de sulfuro de hidrógeno, por otro lado, la altura de 0,42 m presenta una mayor eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno ya que dispone de más material filtrante inoculado con microorganismos.

Para analizar las combinaciones antes definidas en el diseño de experimento con respecto a la eficiencia en la remoción de sulfuro de hidrógeno, se le asigna a cada tratamiento una letra del abecedario y se realiza una gráfica de la eficiencia de remoción versus estos tratamientos, como se muestra continuación (Tabla 11):

Tabla 11. Tratamientos de los niveles analizados para el flujo de biogás ingresado al reactor químico.

Flujo (Lh ⁻¹)	Altura material filtrante (m)	Tratamiento
27,7	0,14	A
55	0,14	B
85,1	0,14	C
27,7	0,28	D
55	0,28	E
85,1	0,28	F
27,7	0,42	G

55	0,42	H
85,1	0,42	I

Graficando las interacciones de las combinaciones expuestas obtenemos:

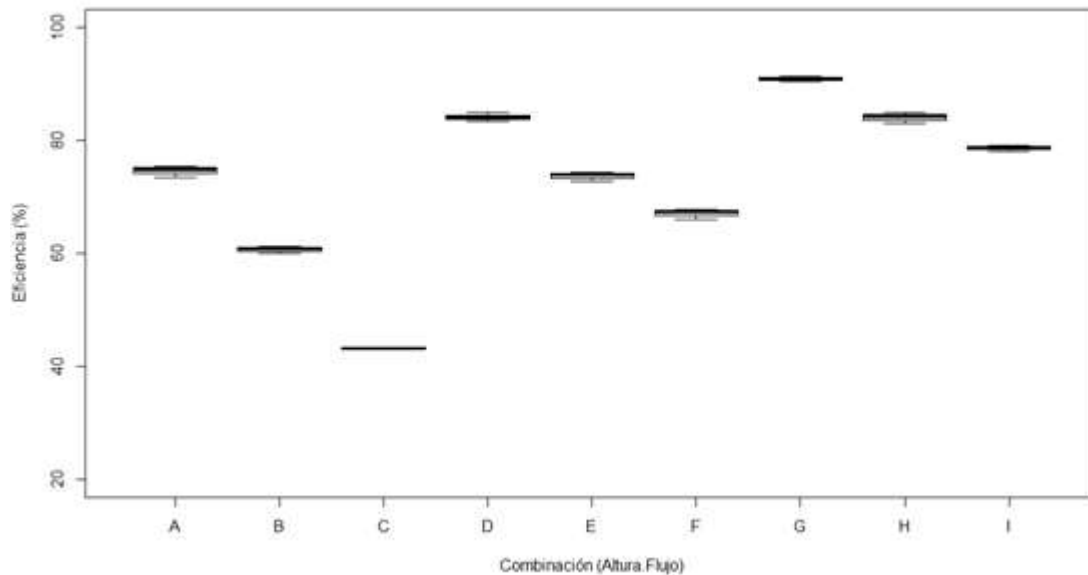


Figura 31. Esquema de interacción de combinaciones del biofiltro.

En la Figura 31 se observa que la combinación C, el flujo más elevado ($85,1 \text{ Lh}^{-1}$) con la altura de material filtrante más baja ($0,14 \text{ m}$) es la que posee menor eficiencia de remoción de H_2S y por su parte la combinación G que involucra el menor flujo de biogás ($27,7 \text{ Lh}^{-1}$) con la altura de $0,42 \text{ m}$ de compost posee la mayor eficiencia de remoción de H_2S , esto es debido a que se dispone de más tiempo y cantidad de material filtrante para efectuar la remoción del contaminante.

El test de Kruskal-Wallis para la altura del material filtrante y para el flujo de biogás que ingresa al biofiltro es el siguiente (Tabla 12).

Tabla 12. Test Kruskal-Wallis para la altura de material filtrante y flujo de biogás (elaboración propia).

Kruskal-Wallis	P-Value
Altura material filtrante	0,0004584
flujo de biogás	0,008415

Como el valor P para ambas variables es menor de 0,05, las dos variables muestran diferencias estadísticamente significativas. La prueba post hoc de Pairwise.willcox relacionó la eficiencia de remoción con la altura del material filtrante y con el flujo de biogás que ingresan al sistema (Tabla 13).

Tabla 13. Pairwise.willcox: Comparación de la Altura material filtrante (0,14; 0,28 y 0,42 m) para la eficiencia (elaboración propia).

	0,14 m	0,28 m
0,28 m	0,0314	-
0,42 m	0,00012	0,002814

Según la prueba post hoc todos los niveles de altura del material presentan diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la eficiencia, ya que los valores p son inferiores a 0,05 (nivel de significancia).

Por su parte, según la tabla 14, al realizar la prueba de Pairwise.willcox para el flujo de biogás (27,7; 55 y 85,1), se evidencia que el flujo de 27,7 Lh⁻¹ posee diferencias significativas con los otros dos flujos de biogás (55 y 85,1 Lh⁻¹), pero por su parte, los valores registrados en cuanto a eficiencia de remoción por el flujo de biogás de 55 Lh⁻¹ no posee diferencias estadísticas con los datos del flujo de 85,1 Lh⁻¹ (Tabla 14).

Tabla 14. Pairwise.willcox: Comparación del flujo de biogás (27,7; 55 y 85,1 Lh⁻¹) para la eficiencia (elaboración propia).

	27,7 Lh⁻¹	55 Lh⁻¹
55 Lh⁻¹	0,037	-
85,1 Lh⁻¹	0,012	0,258

A demás, se realizó el análisis grafico de las interacciones de las variables en el desempeño del biofiltro (Figura 32).

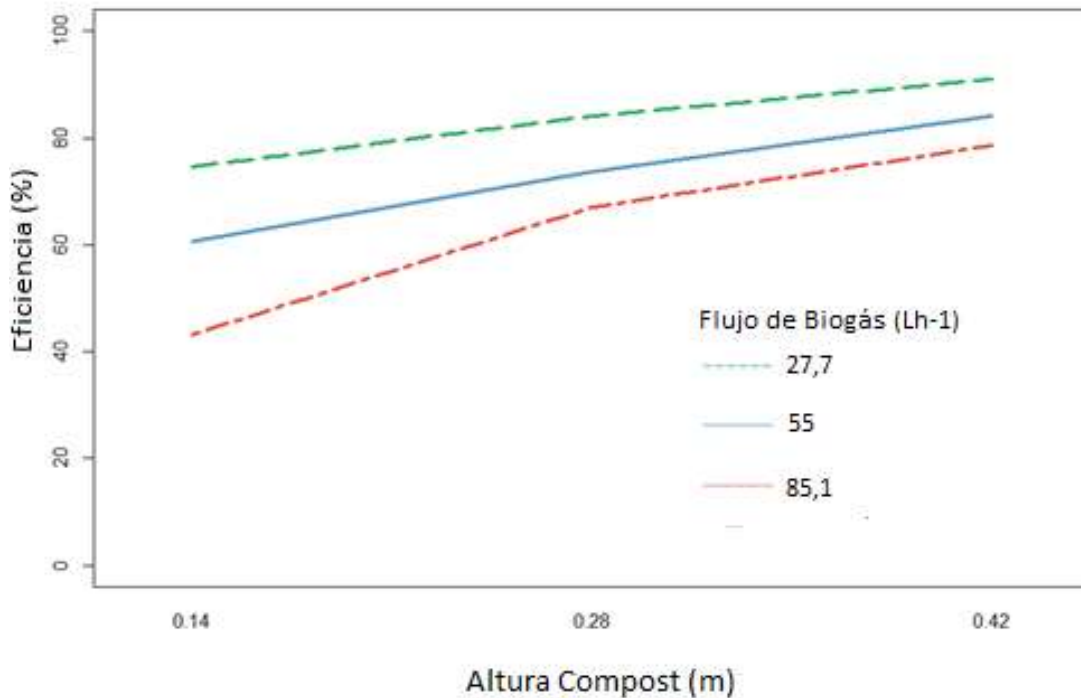


Figura 32. Gráfico de interacción en el biofiltro.

De acuerdo con este gráfico (Figura 32) podemos corroborar lo dicho en la interpretación de los diagramas de caja e interacciones de tratamientos, donde se observa que el desempeño más bajo del biofiltro se presenta en la altura de material filtrante más baja y el flujo de biogás más alto analizado, tendiendo a la estabilización del sistema a medida que aumenta la altura de la columna filtrante.

Para el **análisis económico** se centra en los precios de compra de la materia prima para la construcción del biofiltro se tienen en cuenta varios factores, como son el flujo de biogás a tratar (90 Lh^{-1}), ya que fue el parámetro de diseño, precio más bajo, el precio más alto y el precio promedio de los componentes usados para la construcción; Todo ello basado en los precios de venta de 3 proveedores diferentes (2 tiendas locales y una tienda de gran superficie).

En la Tabla 15 podemos observar que el precio más bajo es el aportado por el proveedor número 2, el cual es una tienda local de la ciudad de Medellín, este precio es de \$ 22.600 pesos colombianos, y el mayor precio registrado es de \$28.200 pesos colombianos y es lo que costaría construir el biofiltro usando materiales adquiridos en alianza con el proveedor número 1 (tienda de gran superficie).

Si bien no existe gran diferencia entre los precios suministrados por los proveedores, este valor puede reducirse más, ya que hay la posibilidad de producir como se hizo en este trabajo

el compost, a partir de residuos sólidos domésticos y de paja el compost necesario para la eliminación del contaminante.

Por otra parte, la columna no se reemplaza totalmente, el cuidado se basa en que ya después de tener acondicionados los microorganismos transformadores de azufre no se pueden dejar un tiempo prolongado sin alimento (Biogás) porque disminuye la efectividad de estos.

Tabla 15. Recopilación de los precios de materiales para la construcción del biofiltro (elaboración propia).

PRODUCTO	CANTIDAD Unidades	FUNCIÓN	PROVEEDOR 1 Valor Unidad	PROVEEDOR 2 Valor Unidad	PROVEEDOR 3 Valor Unidad
Tubo PVC	2	Armazón del reactor	\$ 5.000	\$ 4.300	\$ 4.700
Tapas Entrada/salida	3	Tapas del Reactor	\$ 1.000	\$ 1.000	\$ 1.100
Silicona	1	pegante	\$ 1.500	\$ 1.200	\$ 1.200
Manguera	1	conexiones del reactor	\$ 5.600	\$ 5.300	\$ 4.700
Compost	1.5	Material Filtrante	\$ 5.400	\$ 3.000	\$ 4.200

TOTAL PROVEEDOR 1	TOTAL PROVEEDOR 2	TOTAL PROVEEDOR 3
\$ 10.000	\$ 8.600	\$ 9.400
\$ 3.000	\$ 3.000	\$ 3.300
\$ 1.500	\$ 1.200	\$ 1.200
\$ 5.600	\$ 5.300	\$ 4.700
\$ 8.100	\$ 4.500	\$ 6.300
\$ 28.200	\$ 22.600	\$ 24.900

7.4.2. Análisis estadístico y económico reactor químico no regenerativo

Para las condiciones analizadas en el diseño de experimentos para el reactor de adsorción químico no regenerativo con lana de acero (Figura 33), observamos que la mayor eficiencia en la remoción de sulfuro de hidrógeno se presenta cuando se usa la mayor cantidad de lana de acero, en este caso es de 30 gramos; por su parte se observa una mayor dispersión de los datos obtenidos y la remoción mínima de sulfuro de hidrógeno cuando se usa 10 gramos de lana de acero.

Además, hay solape entre los diagramas de cajas de las 3 masas de adsorbente, lo que sugiere que por lo menos dos niveles analizados en el factor de masa de adsorbente no poseen diferencias estadísticas (Figura 33).

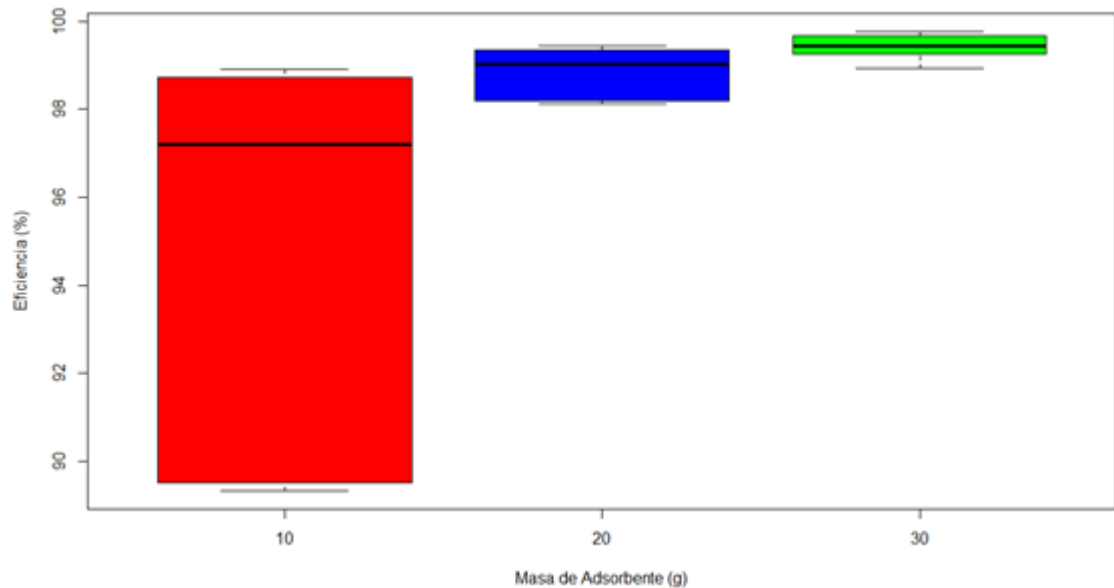


Figura 33. Diagrama de Cajas de Eficiencia vs Masa Adsorbente

Realizando el diagrama de cajas de la eficiencia en la remoción de sulfuro de hidrógeno y el flujo de biogás, se obtiene el siguiente resultado:

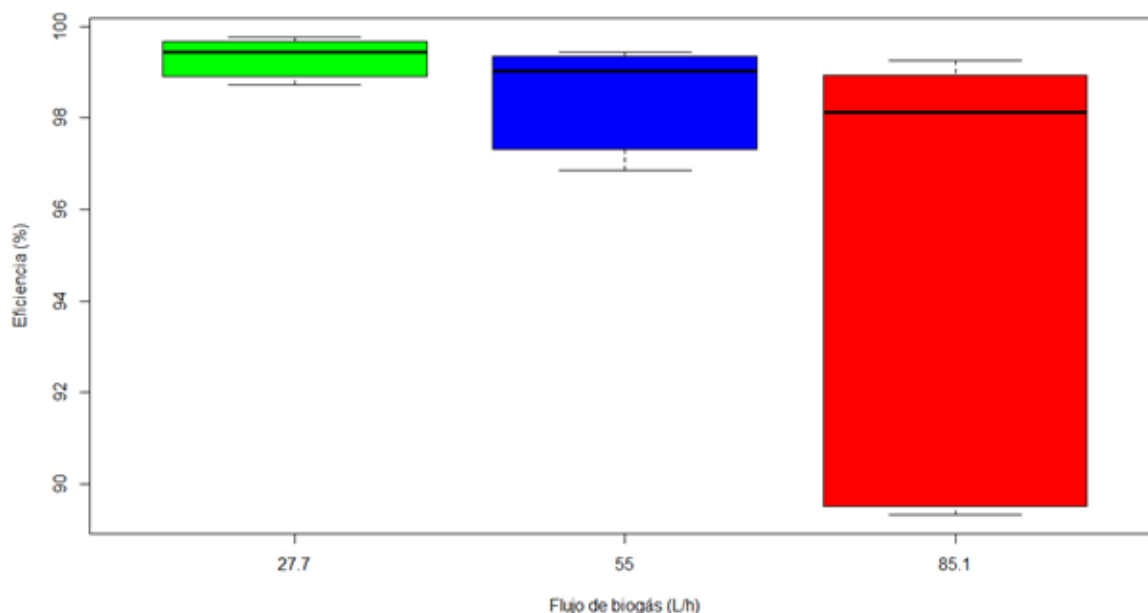


Figura 34. Diagrama de Cajas de Eficiencia vs Flujo de Biogás.

Donde se observa la mayor variabilidad de los datos encontrados para la eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno presente cuando se somete el reactor de adsorción química con lana de acero al flujo más alto propuesto ($85,1 \text{ Lh}^{-1}$), también para esa variable se presenta la menor eficiencia en la remoción de H_2S . (Figura 34)

Por su parte para el flujo más bajo de biogás ($27,7 \text{ Lh}^{-1}$) se presenta la mayor eficiencia en la remoción de sulfuro de hidrógeno, ya que se cuenta con más tiempo para la adsorción del sulfuro de hidrógeno en la lana de acero pretratada.

No se presenta solape entre los diagramas de caja del flujo de biogás de $27,7$ y $85,1 \text{ Lh}^{-1}$, lo que sugiere que estos dos niveles posiblemente presenten diferencias estadísticas.

Una vez dicho esto, para observar el comportamiento de la eficiencia en la remoción de H_2S según los tratamientos (combinaciones) propuestos en el diseño de experimentos se realiza un esquema de interacciones (ver tabla 16).

Tabla 16. Tratamientos y combinaciones de factores (elaboración propia).

Flujo Lh^{-1}	Masa (gramos)	Tratamiento
27,7	10	A
55	10	B
85,1	10	C
27,7	20	D

55	20	E
85,1	20	F
27,7	30	G
55	30	H
85,1	30	I

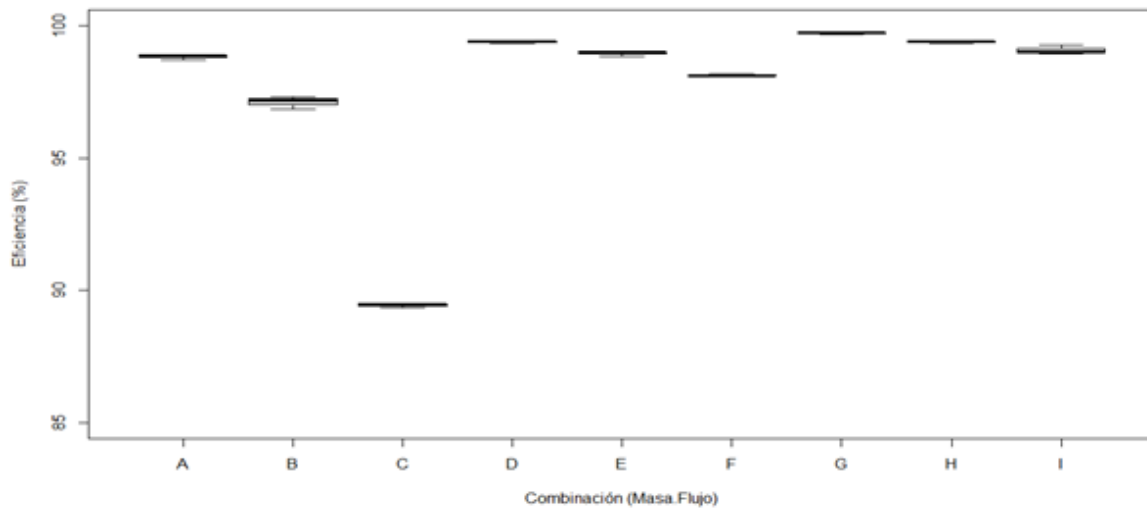


Figura 35. Esquema de interacción de combinaciones.

El esquema de interacción de las combinaciones propuestas muestra que el tratamiento C (Figura 35), como es de esperarse presenta la menor eficiencia en la remoción de sulfuro de hidrógeno, este tratamiento contempla la interacción entre el mayor flujo de biogás (85,1 Lh⁻¹) con la menor masa de adsorbente usada (10 gramos de lana de acero), por su parte, la combinación que presento mejores resultados en cuanto a la eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno es la G, el menor flujo de biogás de ingreso (27,7 Lh⁻¹) con la masa de adsorbente mayor (30 gramos de lana de acero).

AL igual que el biofiltro, la eficiencia no cumplió de nuevo con el diseño de Normalidad, obteniéndose valores P inferiores a 0,05, se llevó a cabo un análisis de varianza no paramétrico unifactorial de Kruskal-Wallis con un nivel de significancia de 0,05.

Tabla 17. Análisis de varianza.

Kruskal-Wallis	P-Value
masa de adsorbente	0,0003715
flujo de biogás	0,01079

Luego para observar las diferencias y similitudes entre las variables analizadas (Tabla 17), se realizó una prueba post hoc tanto para la masa de adsorbente (10, 20 y 30 g) como para el flujo de biogás (27,7; 55 y 88,1 Lh⁻¹) con respecto a la eficiencia registrada en el reactor de adsorción química con lana de acero.

Tabla 18. *Prueba Pairwise.willcox Eficiencia y masa de adsorbente (elaboración propia).*

	10 g	20 g
20 g	0,0154	-
30 g	0,0012	0,0505

Según estos resultados obtenidos en la Tabla 18 se confirma lo dicho en el análisis del diagrama de cajas con respecto a la eficiencia de remoción versus la masa de adsorbente, donde la masa de adsorbente de 20 gramos con respecto a la masa de 30 gramos de lana de acero no presenta diferencias significativas estadísticamente hablando. Pero si se presenta diferencias estadísticas entre la masa de adsorbente de 10 gramos con respecto a las masas de 20 y 30 gramos.

Por su parte, para el análisis post hoc del nivel de flujo de biogás que ingresa al reactor de adsorción química no regenerativa, muestra lo siguiente (Tabla 19).

Tabla 19. *Pairwise.willcox Eficiencia y flujo de biogás (elaboración propia).*

	27,7 Lh⁻¹	55 Lh⁻¹
55 Lh⁻¹	0,113	-
85,1 Lh⁻¹	0,018	0,133

Observamos que existe una diferencia estadística entre los niveles de 27,7 Lh⁻¹ y 85,1 Lh⁻¹ y esto se ve reflejado en que en estos dos niveles presentan la menor y mayor eficiencia de remoción de H₂S respectivamente.

Por lo contrario, los flujos de 27,7 Lh⁻¹ con 55 Lh⁻¹ y 55 Lh⁻¹ con 85,1 Lh⁻¹ no poseen diferencias estadísticas una vez realizada la prueba post hoc para el análisis de la información. Dicho lo anterior, toda la información suministrada se puede esquematizar en un gráfico de interacción de los 6 factores para los 2 niveles analizados.

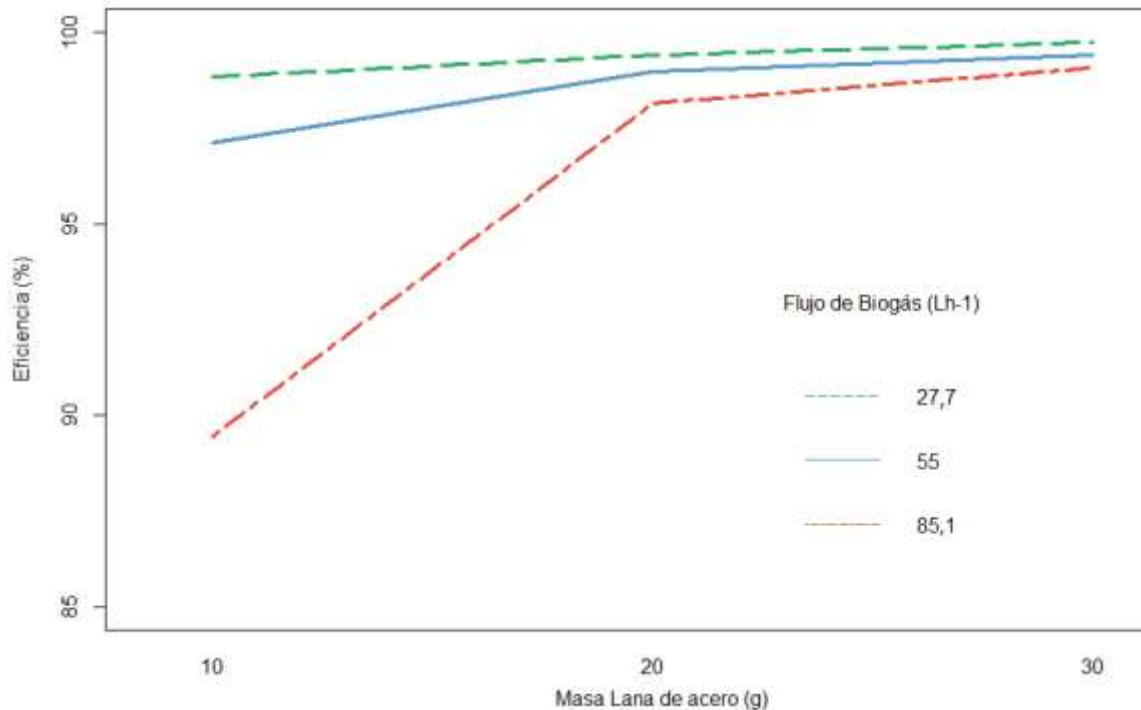


Figura 36. Gráfico de interacción en el reactor de adsorción química.

En la Figura 36 se observamos el comportamiento de la eficiencia a medida que se modifican los diferentes niveles, confirmando la disminución en la remoción de sulfuro de hidrógeno en los niveles de masa de adsorbente de 10 gramos y un flujo de 85,1 Lh⁻¹ (línea roja), una vez aumentado la masa de adsorbente a 20 gramos, este comportamiento tiende a poseer un comportamiento similar con los demás niveles analizados.

Cabe resaltar que el eje correspondiente a la eficiencia en este gráfico inicia desde el valor de 85%, esto porque la eficiencia de remoción de H₂S es tan alta que al exponer el gráfico partiendo desde 0% de eficiencia, se hacía difícil el reconocimiento del comportamiento aportados por todos los niveles y factores del experimento.

Para el **análisis económico** se centra en los precios de compra de la materia prima para la construcción del reactor de adsorción química con lana de acero se tienen en cuenta varios factores, como son el precio más bajo, el precio más alto y el precio promedio de los componentes usados para la construcción; Todo ello basado en los precios de venta de 3 proveedores diferentes (2 tiendas locales y una tienda de gran superficie) (Tabla 20).

Tabla 20. Recopilación de los precios de materiales para la construcción del reactor de adsorción química con lana de acero (elaboración propia).

Producto	Cantidad Unidades	Función	Proveedor 1 Valor unidad	Proveedor 2 Valor unidad	Proveedor 3 Valor unidad
Tubo PVC (50 CM)	2	Armazón del reactor	\$ 5.000	\$ 4.300	\$ 4.700
Tapas Entrada/salida	3	Tapas del Reactor	\$ 1.000	\$ 1.000	\$ 1.100
Silicona	1	pegante	\$ 1.500	\$ 1.200	\$ 1.200
Manguera	1	conexiones del reactor	\$ 5.600	\$ 6.300	\$ 4.700
Lana de acero	10	Material Filtrante	\$ 1.900	\$ 2.300	\$ 2.000

Total Proveedor 1	Total Proveedor 2	Total Proveedor 3
\$ 10.000	\$ 8.600	\$ 9.400
\$ 3.000	\$ 3.000	\$ 3.300
\$ 1.500	\$ 1.200	\$ 1.200
\$ 5.600	\$ 6.300	\$ 4.700
\$ 19.000	\$ 23.000	\$ 20.000
\$ 39.100	\$ 42.100	\$ 38.600

Se puede observar que el precio más bajo es el aportado por el proveedor número 3, el cual es una tienda local de la ciudad de Medellín, este precio es de \$ 38.600 pesos colombianos, y el mayor precio registrado es de \$ 42.100 pesos colombianos y es lo que costaría construir el reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero usando materiales adquiridos en alianza con el proveedor número 2 que al igual que el biofiltro, son precios aportados por una tienda de gran superficie.

La accesibilidad de los materiales es muy buena, ya que fácil la adquisición de los mismo en locales comerciales de la ciudad, con respecto al biofiltro, la diferencia obtenida entre los precios mínimos de construcción radica en el aumento de los costos generados por la adquisición de la lana de acero.

Por otra parte, Se evidencia el impacto que tiene la lana de acero sobre la remoción de sulfuro de hidrógeno sabiendo que según los experimentos realizados esta se debe trabajar mínimo a 20 g para obtener remociones cercanas a las obtenidas a 30 g. Finalmente, realizando una recopilación de los hallazgos más relevantes (Tabla 21), tenemos:

Tabla 21. Recopilación de la información (elaboración propia)

	% remoción de H₂S Máxima	% remoción de H₂S Mínima	Costo de construcción (COP)	Ventaja	Desventaja
Biofiltro	91% de H ₂ S	43% de H ₂ S	\$ 22.600	Bajo Costo de construcción	alta sensibilidad a cambios de variables operacionales
Reactor de adsorción química	99% de H ₂ S	89% de H ₂ S	\$ 38.600	Alta remoción	Alto costo de construcción y operación

8. Conclusiones

Para un biofiltro construido a partir de materiales de bajo costo como son tubos de PVC, tapas plásticas, mangueras de silicona y como material filtrante compost (elaborado caseramente) es posible obtener una remoción máxima de 91% aproximadamente de sulfuro de hidrógeno presente en un biogás generado a partir de POME o residuo del proceso de extracción de aceite de palma en condiciones de operación de $27,7 \text{ Lh}^{-1}$ de flujo de biogás ingresado al sistema y 0,14 m de compost usado, esta remoción es obtenida con una inversión de construcción de \$22.600 pesos colombianos (precio mínimo).

Por su parte, el reactor de adsorción química con lana de acero presenta mayor eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno, esto radica esencialmente en la naturaleza del material adsorbente, la lana de acero pretratada posee más sitios activos y una cinética más veloz que el compost, esta eficiencia máxima es de aproximadamente 99% de sulfuro de hidrógeno removido, para obtener esta remoción se debe de invertir en la adquisición de los materiales para construir el reactor \$ 38.600 pesos colombianos (precio mínimo) y se deben de cumplir los valores de 30 gramos de lana de acero y $27,7 \text{ Lh}^{-1}$ de biogás para los parámetros operacionales.

Si bien sólo se presenta una diferencia porcentual de 8 puntos en cuanto a la remoción de H_2S entre el biofiltro y el reactor químico, este 8% puede ser determinante a la hora de cumplir con un valor pequeño y exacto de concentración de sulfuro de hidrogeno, esto en el caso de optar por cumplir una normatividad existente según sea el caso específico, pero también pueden llegar a presentar casos donde este 8% de diferencia no justifique la inversión económica entre ambos sistemas.

Dicho lo anterior, también es importante resaltar que, en comparación al reactor de adsorción química no regenerativa con lana de acero, el sistema de biofiltración presenta una mayor sensibilidad antes los cambios efectuados en el sistema, presentando una mayor caída de la eficiencia en la remoción de H_2S si se aumenta el flujo de biogás.

Tabla 22. Conclusión (Elaboración propia).

	% remoción de H₂S Máxima	% remoción de H₂S Mínima	Costo de construcción (COP)	Ventaja	Desventaja	Saturación
Biofiltro	91% de H ₂ S	43% de H ₂ S	\$ 22.600	Bajo Costo de construcción	Alta sensibilidad a cambios de variables operacionales	0,28 gramos de H ₂ S eliminados por 1 gramo de compost
Reactor de adsorción química	99% de H ₂ S	89% de H ₂ S	\$ 38.600	Alta remoción	Alto costo de construcción y operación	14,82 gramos de H ₂ S eliminados por 1 gramo de lana de acero

9. Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados encontrados en la evaluación de remoción de sulfuro de hidrógeno tanto para el biofiltro como para el reactor de adsorción química, es necesario analizar y evaluar puntos o niveles superiores a $85,1 \text{ Lh}^{-1}$ en cuanto al flujo de biogás que ingresan a ambos sistemas, esto con el fin de observar de mejor manera el comportamiento de estos ante escenarios críticos y desfavorables donde la eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno cae drásticamente.

Es importante realizar un estudio adicional de los costos operacionales que involucra en el procedimiento, porque si bien la reacción de remoción de H_2S es espontánea tanto en el biofiltro como en el reactor de adsorción química con lana de acero, el reactor de adsorción química posee costos adicionales asociados al cambio total de la columna del lecho cuando esta se satura por completo, basados en los datos obtenidos en el análisis de saturación que se presentó en la sección 7.3.2.

Referencias

- Aita, B. C., Mayer, F. D., Muratt, D. T., Brondani, M., Pujol, S. B., Denardi, L. B., Hoffmann, R., & Silveira, D. D. (2016). Biofiltration of H₂S-rich biogas using *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(3), 689–703. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-1043-5>
- Adnan, A. I., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Chew, K. W., & Show, P. L. (2019). Technologies for biogas upgrading to biomethane: A review. *Bioengineering*, 6(4), 1–23. <https://doi.org/10.3390/bioengineering6040092>
- Arellano, L., Dorado, A. D., Fortuny, M., Gabriel, D., Gamisans, X., González-sánchez, A., Hernández, S., Lafuente, J., Monroy, O., Mora, M., Revah, S., & Sierra, H. (2017). *Purificación y usos del biogás Purification* (1a ed.). Universitat Autònoma de Barcelona. https://www.researchgate.net/profile/Hugo-Percy-Goldberg/publication/316656176_Purificacion_y_usos_del_biogasPurification_and_use_of_biogas/links/5ee8c242458515814a62aabd/Purificacion-y-usos-del-biogas-Purification-and-use-of-biogas.pdf
- Asrar, N., MacKay, Birketveit, Ø., Stipanicev, M., Jackson, J., Jenkins, A., Melot, D Scheie, J., & Vittonato, J. (2016). La corrosión: La lucha más extensa. *Oilfield Review*, 28(2), 16. <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/quimica-analitica-ii/03-corrosion-spanish/8862124>
- Barbusinski, K., Parzentna-Gabor, A., & Kasperczyk, D. (2021). Removal of Odors (Mainly H₂S and NH₃) Using Biological Treatment Methods. *Clean technologies*, 3(1), 138-155. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3010009>
- Benavente, M., & Pavel, E. (2019). Purificación de metano por biofiltración de biogás, utilizando compost como materia soporte [Trabajo de grado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio de tesis UCSM. <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/8992>
- Cuesta, J. (2015). *Obtención de biogás a partir de Residuos Sólidos Urbanos para su inyección a Red* [Trabajo de grado, Universidad Carlos III de Madrid]. e-Archivo. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/10016/23542>
- Devanny, J., Deshusses, M., & Webster, T. (1999). *Biofiltration for Air Pollution Control*. (1a ed). (CRC Press, Ed.). Lewis Publishers.
- El Colombiano. (2015, abril 24). [Alertan por capacidad de rellenos sanitarios en el país. Recuperado de: https://www.elcolombiano.com/colombia/alertan-por-capacidad-de-rellenos-sanitarios-en-el-pais-GN1791080](https://www.elcolombiano.com/colombia/alertan-por-capacidad-de-rellenos-sanitarios-en-el-pais-GN1791080)
- FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF. (2011). *Manual del Biogás. Proyecto CHI/00/G32*. <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

- Fischer, M. (2010). *Biogas purification: H₂S Removal using biofiltration*. [Tesis de maestría, University of Waterloo]. UWSpace. <http://hdl.handle.net/10012/5458>
- Fontenelle, M., Alves, H. J., Monteiro, M. R., Higa, S. M., Della Rovere, C. A., Pellizzer, E. L., & Fontenelle, I. (2017). Evaluation of corrosion caused by the use of in natura biogas in steam generator boilers of carbon steel structural elements. *Materials Research*, 20(3), 725–735. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0445>
- Friedrich, C. G., Rother, D., [Bardischewsky](#), F., [Quentmeier](#), A., & Fischer, J. (2001) Oxidation of reduced inorganic sulfur compounds by bacteria: Emerge of a common mechanism?. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(7), 2873-2882. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.7.2873-2882.2001>
- Gallo, T. (2017). *Efectos nocivos del humo de la combustión sobre la salud y el medio ambiente*. Diputación Provincial de Sevilla.
- Gómez, E. N. & Roa, N. (2020). Desarrollo de una herramienta para el diseño de un sistema de remoción de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás empleando lana de acero. [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8115>
- Guidotti, T. (2010). Hydrogen Sulfide: Advances in Understanding Human Toxicity. *International Journal of Toxicology*, 29(6), 569-581. <https://doi.org/10.1177/1091581810384882>
- Harmon, S. M., Kautter, D. A., & Peeler, J. T. (1971). Improved medium for enumeration of *Clostridium perfringens*. *Applied microbiology*, 22(4), 688-692.
- Hidalgo, D., Antolín, G., Castro, J., Bedate, S., Marlín, J., Corona, F., Uruña, A., Díez, D., Aguilar, O., Sandoval, G., Bolaños, R., Moreno, L., Dávila, G., Peña, J., Salazar, I., Jiménez, H., Tancredi, N., Amaya, A., Reyes, C., ... Chaim, G. (2020). *Producción de biometano para combustible de transporte a partir de residuos de biomasa*. BIOMETRANS – CYTED. https://www.cytcd.org/sites/default/files/d4._implementacion_de_tecnologias_pag_1-100.pdf
- Khadaroo, S., Poh, P., Gouwanda, D., & Grassi, A. B. (2019). Applicability of various pretreatment techniques to enhance the anaerobic digestion of Palm oil Mill effluent (POME): A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2019)103310.
- Labbe, R. (1983). Enumeration and confirmation of *Clostridium perfringens*. *Journal of Food Protection*, 46, 68-73, <https://doi.org/10.4315/0362-028X-46.1.68>.
- Latosov, E., Looits, M., Maaten, B., Volkova, A., & Soosaar, S., (2017). Corrosive effects of H₂S and NH₃ on natural gas piping systems manufactures of carbon steel. *Energy Procedia*, 128(2017), 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.319>
- López, J., Ramírez, B., Gomes, C., & Morgan-Sagastume, J. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales* (1a ed.). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/265430/Guia_lodos_2017.pdf
- Martínez, R. (2018). *Simulación de la desulfuración de biogás por adsorción en un medio nano particulado de alta porosidad*. [Trabajo de maestría, Centro de Investigación en Materiales Avanzados] Repositorio Institucional Mx <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1929/1/MCTA18.pdf>

- Moreno, M. (2014). *Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Litoral]. Biblioteca Virtual UNL. <http://hdl.handle.net/11185/572>
- Muñoz, M. (2007). *Viabilidad de un proceso para la eliminación conjunta de H₂S y NH₃ contenido en efluentes gaseosos*. [Tesis de doctorado, Universidad de Cádiz]
- Niesner, J., Jecha, D., & Stehlík, P. (2013). Biogas upgrading technologies: State of art review in european region. *Chemical Engineering Transactions*, 35, 517–522. <https://doi.org/10.3303/CET1335086>
- NIOSH. (1994). *Manual of Analytical Methods (NMAM)* (4a ed.). <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/6013.pdf>
- Omar, B., El-Gammal, M., Abou-Shanab, R., Fotidis, I. A., Angelidaki, I., & Zhang, Y. (2019). Biogas upgrading and biochemical production from gas fermentation: Impact of microbial community and gas composition. *Bioresource Technology*, 286, 121413. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121413>
- Peña, D., & Fuentes, C. (2007). Predicción de la corrosión por CO₂ + H₂S en tuberías de acero al carbono. *Scientia et Technica*, 4(36), 881–886. <https://doi.org/10.22517/23447214.5147>
- Rajivgandhi, M. M. C., & Singaravelu, M. (2014). Upgrading Biogas to Biomethane by Physical Absorption Process. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 7(3), 639-644. <https://doi.org/10.5958/2230-732x.2014.01370.9>.
- Riyadi, U; Kristanto, G.A & Pradi, C. R. Utilization of steel wool as removal media of hydrogen sulfide in biogas. OP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2015. p. 1-4. "
- Torres-Calderón, S., Paucar-Palomino, M. J., & Pampa-Quispe, N. B. (2020). Adsorción de sulfuro de hidrógeno del biogás mediante virutas de hierro pretratadas para su reaprovechamiento energético. *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, 41(1), 18–29.
- Varnero, M. T., Carú, M., Galleguillos, K., & Achondo, P. (2012). Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación eléctrica. *Información Tecnológica*, 23(2), 31–40. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000200005>
- Wang, J., Mahmood, Q., Qiu, J. P., Li, Y. S., Chang, Y. S., & Li, X. D. (2015). Anaerobic treatment of palm oil mill effluent in pilot-scale anaerobic EGSB Reactor. *BioMed Research International*, 2015, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2015/398028>
- Yang, Y., & Allen, E., (2012). Biofiltration control of hydrogen sulfide 1. design and operational parameters. *Air and Waste*, 44(7). <https://doi.org/10.1080/1073161X.1994.10467287>