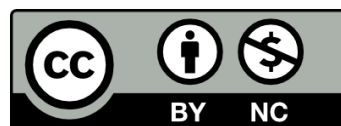


INFORME TÉCNICO DEL CONCEPTO: DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE  
SULFURO DE HIDRÓGENO (H<sub>2</sub>S) EN BIOGAS OBTENIDO POR LA DIGESTIÓN  
ANAEROBIA DE EXCRETAS ANIMALES MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE UN  
ADITIVO NANOESTRUCTURADO DE HIERRO.



KARLA FERNANDA FELICIANO NIEVA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
VILLAVICENCIO

2022

INFORME TÉCNICO DEL CONCEPTO: DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE SULFURO DE HIDRÓGENO (H<sub>2</sub>S) EN BIOGAS OBTENIDO POR LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE EXCRETAS ANIMALES MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE UN ADITIVO NANOESTRUCTURADO DE HIERRO.

KARLA FERNANDA FELICIANO NIEVA

Informe Técnico de auxiliar de investigación presentada para optar el título profesional en Ingeniería Ambiental

Director

PhD. CHRISTIAN JOSE ROJAS REINA

PhD, Msc, Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
VILLAVICENCIO

2022

**Autoridades Académicas**

**Fray José Gabriel MESA ANGULO, OP.**

Rector General

**Fray Eduardo GONZÁLEZ GIL, O.P.**

Vicerrector Académico General

**Fray José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.**

**Rector Académico Sede Villavicencio**

**Fray Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.**

**Vicerrector Académico Sede Villavicencio**

**Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TABÓN**

Secretaria de División Sede Villavicencio

**Mg. WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE**

Decano Facultad de Ingeniería Ambiental

## Contenido

Resumen .....	7
Abstract .....	8
1. Introducción .....	9
2. Justificación .....	11
3. Objetivos del Macroproyecto.....	15
4. Objetivos de la Auxiliatura de Investigación.....	16
Objetivo General.....	16
Objetivos Específicos.....	16
5. Metodología .....	17
Fase 1. Caracterización del sustrato .....	18
Fase 2. Montaje de los Reactores pilotos en el laboratorio .....	19
Fase 3. Evaluación de la digestión anaerobia .....	20
Resultados y Análisis .....	22
Fase 1. Caracterización del sustrato .....	22
Fase 2. Montaje de los Reactores pilotos en el laboratorio .....	26
Fase 3. Evaluación de la digestión anaerobia .....	28
6. Conclusiones .....	54
7. Referencias Bibliográficas .....	57
Anexos.....	61

**Lista de tablas**

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de los sustratos avícola, bovino y Porcicola.....	19
Tabla 2. Materiales y equipos.....	20
Tabla 3. Registro de los datos obtenidos para determinar los sólidos totales. ....	23
Tabla 4. Contenido de sólidos totales en los tres sustratos (bovino, codorniz y porcino). ....	24
Tabla 5. Registro de los datos obtenidos para determinar los sólidos volátiles. ....	25
Tabla 6. Contenido de sólidos volátiles en los tres sustratos (bovino, codorniz y porcino). ....	26
Tabla 7. Parámetros químicos de los sustratos (bovino, codorniz y porcino). ....	26
Tabla 8. Concentración de aditivo nano estructurado para los tres sustratos (bovino, codorniz y porcino). ....	27
Tabla 9. Características del aditivo nano estructurado de hierro.....	28
Tabla 10. Resultados de la producción de biogás a partir de excretas porcinas. ....	29
Tabla 11. Resultados de la producción de biogás a partir de excretas avícolas (codorniz) ....	36
Tabla 12. Resultados de la producción de biogás a partir de excretas por bovino .....	46

### Lista de figuras

Figura 1. Métodos de remoción del Sulfuro de Hidrógeno. ....	13
Figura 2. Valores de la producción de biogás a partir de excretas porcinas (25-mayo-2022)..	31
Figura 3. Valores de la producción de biogás a partir de excretas porcinas (26-mayo-2022)..	32
Figura 4. Valores de la producción de biogás a partir de excretas porcinas (27-mayo-2022)..	33
Figura 5. Valores de la producción de biogás a partir de excretas porcinas (31-mayo-2022)..	35
Figura 6. Valores de la producción de biogás a partir de excretas porinas (1- junio-2022) .....	41
Figura 7. Valores de la producción de biogás a partir de excretas porcinas (2- junio-2022) ...	42
Figura 8. Valores de la producción de biogás a partir de excretas avícolas (14- junio-2022)..	43
Figura 9. Valores de la producción de biogás a partir de excretas avícolas (15- junio-2022)..	44
Figura 10. Valores de la producción de biogás a partir de excretas avícolas (16- junio-2022)	45
Figura 11. Valores de la producción de biogás a partir de excretas avícolas (17- junio-2022)	45
Figura 12. Valores de la producción de biogás a partir de excretas avícolas (20- junio-2022)	45
Figura 13. Valores de la producción de biogás a partir de excretas bovino (04- julio-2022)..	50
Figura 14. Valores de la producción de biogás a partir de excretas bovino (05- julio-2022)..	51
Figura 15. Valores de la producción de biogás a partir de excretas bovino (06- julio-2022)..	51
Figura 16. Valores de la producción de biogás a partir de excretas bovino (07- julio-2022).	52
Figura 17. Valores de la producción de biogás a partir de excretas bovino (09- julio-2022)..	53

## Resumen

El trabajo investigativo presentado, abarcó objetivos específicos del macroproyecto “Aditivo nano estructurado para reducir el contenido de H<sub>2</sub>S en biogás producido por digestión anaerobia”. El desarrollo experimental comprendió inicialmente la evaluación de la digestión anaerobia de un sustrato específico (heces avícola, bovina y porcina) registrando la producción normal de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), para una vez finalizado, realizar nuevamente la evaluación añadiendo diferentes concentraciones de un aditivo nano estructurado de hierro con el propósito de mejorar el proceso de digestión anaerobia y disminuir la concentración de H<sub>2</sub>S en el biogás producido.

Seguido a esto, se caracterizó el sustrato a través de los siguientes parámetros fisicoquímicos: Sólidos Totales (%p/p), Sólidos Volátiles (%ST). Indicando la cantidad de agua y materia biodegradable, y el pH para establecer el grado de acidez o alcalinidad que presenta la muestra. Luego de caracterizar el sustrato, se procedió a ejecutar el montaje de los seis mini reactores experimentales tipo batch en condiciones mesófilas (37°C), midiendo principalmente la producción de biogás, metano y H<sub>2</sub>S por un periodo de 4 meses. Finalmente se registró la producción de biogás sin y con aditivo nanoestructurado de hierro con el fin de identificar los niveles de H<sub>2</sub>S y el mejoramiento en la calidad del biogás producido.

**Palabras clave:** Excrementos sólidos, digestión anaerobia, biogás, sulfuro de hidrogeno, nano partículas de hierro.

### Abstract

The research work presented covered specific objectives of the macroproject "Nanostructured additive to reduce H<sub>2</sub>S content in biogas produced by anaerobic digestion". The experimental development initially included the evaluation of the anaerobic digestion of a specific substrate (poultry, bovine and swine feces) recording the normal production of hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S), and once finished, the evaluation was performed again by adding different concentrations of a nanostructured iron additive with the purpose of improving the anaerobic digestion process and reducing the concentration of H<sub>2</sub>S in the biogas produced.

After this, the substrate was characterized through the following physicochemical parameters: Total Solids (%p/p), Volatile Solids (%ST). Indicating the amount of water and biodegradable matter, and pH to establish the degree of acidity or alkalinity of the sample. After characterizing the substrate, the six experimental mini batch reactors were set up under mesophilic conditions (37°C), measuring mainly the production of biogas, methane and H<sub>2</sub>S for a period of 4 months. Finally, the production of biogas without and with iron nanostructured additive was recorded in order to identify the levels of H<sub>2</sub>S and the improvement in the quality of the biogas produced.

**Keywords:** Solid excreta, anaerobic digestion, biogas, hydrogen sulfide, iron nanoparticles.

## 1. Introducción

La actividad avícola, porcícola y ganadera a través de los años ha mejorado la economía en diversos países pero también ha favorecido al aumento desmedido de residuos agrícolas que no son aprovechados. Actualmente las fuentes de energía renovable se han posicionado y han despertado mayor interés por su facilidad al producirse y por favorecer el mejoramiento de la calidad de vida especialmente de las personas ubicadas en las zonas no interconectadas (ZNI). (McKinsey, 2003). Los residuos sólidos agrícolas pueden ser aprovechados mediante procesos de degradación anaerobia en donde junto con la acción de diversas bacterias y en un ambiente ausente de oxígeno se obtiene un producto denominado biogás, gas compuesto entre 40 y 70% de metano, 60% dióxido de carbono, 0,1% hidrógeno, 0,1% nitrógeno, 0,1% monóxido de carbono, 0,1% oxígeno y 0,1% sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ) (Arrieta, 2016).

El problema principal a la hora de aprovechar el biogás es el contenido de sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ), ya que representa toxicidad y corrosión. Razón por la cual se han desarrollado numerosas tecnologías para contribuir a la remoción de  $H_2S$ , entre las que sobresalen las generadas a partir de óxidos metálicos (nanopartículas) con la capacidad de adsorción relacionada con el área superficial. Esta técnica da la posibilidad de remover el  $H_2S$  a pequeña escala, gracias a su sencilla operación de adición sobre el biogás generado (Rincón & Rozo, 2021).

La ejecución del proyecto de investigación abarcó objetivos específicos del macroproyecto “Aditivo nanoestructurado para reducir el contenido de  $H_2S$  en biogás producido por digestión anaerobia”, de la Facultad de Ingeniería Ambiental, junto con el apoyo de la Pontificia Universidad Javeriana. El objetivo de la presente Auxiliatura de Investigación fue determinar la efectividad de un aditivo nano estructurado de hierro en la calidad de biogás producido en un proceso de digestión

anaerobia a escala laboratorio y a nivel experimental usando seis micro reactores tipo batch de 1L de capacidad.

Una vez caracterizado el sustrato se realizó un montaje de seis reactores mini tipo batch en condiciones mesofílicas (37°C), donde se analizó la producción de biogás sin y con aditivo nano estructurado de hierro, determinando las mejoras en cuanto a la calidad de biogás producido. Cada uno de los mini reactores fue llenado con 200 ml de inóculo activo de bacterias anaerobias (reactor con agitador continuo alimentado cada tres días con excretas bovinas) y 300 ml de una mezcla de excretas/agua en proporción 1:7 de los siguientes animales: cerdos, codornices y vacas. El desarrollo experimental permitió la evaluación comparativa de la digestión anaerobia de los sustratos, registrando la producción normal de sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ) y realizando la misma evaluación, añadiendo un aditivo nano estructurado de hierro para mejorar el proceso de digestión anaeróbica y disminuir la concentración de  $H_2S$  en el biogás producido.

Los resultados previamente realizados en otras investigaciones favorecen identificar los sustratos viables para contar con niveles óptimos de producción de biogás y abarcar de manera eficaz la reducción del gas que presenta incidencia en la calidad del gas producido. La diferencia en torno a los análisis que se han realizado en base a la producción de biogás, resalta principalmente la innovación de suministrar nano partículas de hierro con el fin de identificar si se produce una reducción significativa en los niveles de concentración del sulfuro de hidrogeno, uno de los gases que compone el biogás, cumpliendo con una metodología experimental que favorece el análisis detallado día a día de la producción normal diaria de biogás y la comparación con los niveles obtenidos luego de adicionar el uso del aditivo nano estructurado.

## 2. Justificación

Colombia produce una gran cantidad de residuos agrícolas que por sus características son viables para ser implementados en la producción de energía a partir del proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás. Una parte significativa de estos residuos son generados en las zonas rurales del país, donde la interconexión con el sistema de energía y gas natural no es adecuada y carecen de servicios vitales para suplir sus necesidades, indicando ser una oportunidad viable de implementar la generación de biogás para mejorar la salud y la calidad de vida en general de la población. (Quintero, 2019).

Existe gran variedad de biodigestores que se adecuan a las necesidades, tipo de suelo y área en específico. Teniendo en cuenta las condiciones de las zonas rurales en la Orinoquia, el biodigestor más adecuado es el digester tubular, que gracias a sus características, materiales y fácil forma de alimentación con excretas porcinas o bovinas, demuestra que podría llegar a obtener una mayor producción y rendimiento del biogás al implementarse desechos agrícolas de mayor potencial en codigestión (Garfí, 2016).

Es de gran importancia implementar métodos que faciliten el mejoramiento de la calidad del biogás producido, ya que dentro de los gases compuestos, sobresale el sulfuro de hidrogeno que es altamente toxico y perjudicial para la salud, ya que tener exposición o contacto puede provocar problemas respiratorios e irritación en nariz y ojos (Prabhu, 2021). Razón por la cual, es necesario realizar pruebas piloto a escala laboratorio con el fin de estimar el potencial real de contenido de sulfuro de hidrogeno generado en cada biodigestor (Ventorino, 2018).

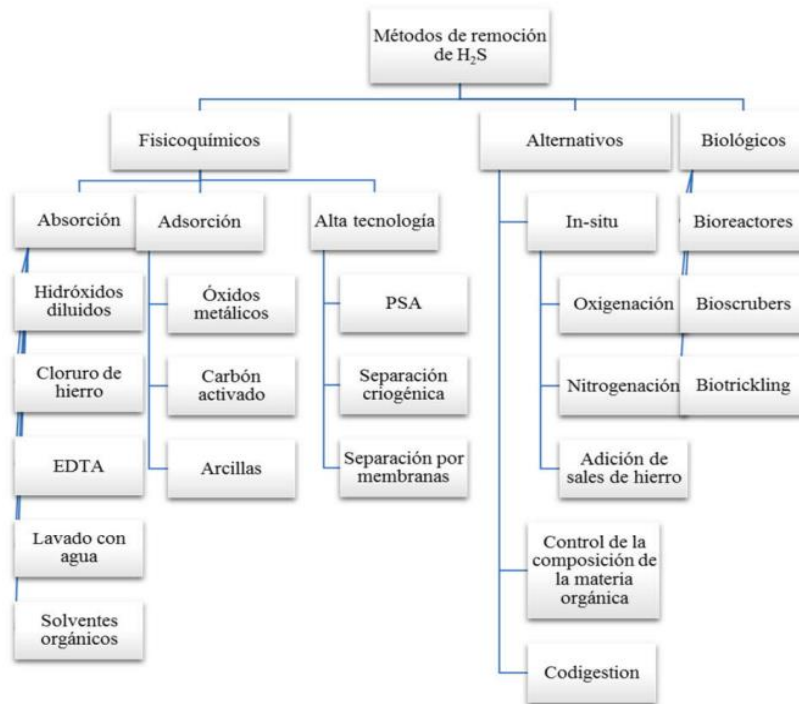
El porcentaje producido de biogás va a depender de diversos factores y la composición del sustrato a implementar. Los factores que puedan incidir en la relación de concentración de la materia orgánica frente a la producción de biogás son los siguientes: tipo de sustrato, tipo de inóculo, presencia de metales, duración del experimento, factores ambientales (humedad, temperatura, pH), entre otros (Ciotola, 2011).

El sulfuro de hidrogeno es producido en la etapa de fermentación y la concentración depende de la cantidad de materia orgánica proporcionada y se considera como uno de los contaminantes más importantes del biogás debido a los riesgos que puede ocasionar en el cuerpo humano y afectaciones a las tuberías por corrosión (Marco, 2017).

Teniendo en cuenta la importancia de reducir los niveles de generación de  $H_2S$ , es necesario conocer la concentración inicial producida a partir de los sustratos seleccionados (avícola, bovino y porcino) que por sus características fisicoquímicas representan gran potencial en la producción de biogás, teniendo en cuenta que la calidad del gas va asociada principalmente a menor porcentaje de  $H_2S$ , se obtiene mayor eficiencia y capacidad de ser equivalente al gas natural, llegando a ser muy atractivo debido a la rentabilidad que genera y ser amigable con el medio ambiente.

Existen diferentes tipos de remoción del sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ) en los que se divide según las características de sustrato utilizado, parámetros fisicoquímicos o biológicos previamente analizados o métodos alternativos que puedan aplicarse ya sea in situ o con adiciones de partículas que favorezcan a la reducción de porcentaje generado inicialmente, a continuación se muestran en la *Figura 1* la clasificación de los métodos más conocidos para remover la concentración de  $H_2S$ .

**Figura 1.** Métodos de remoción del Sulfuro de Hidrógeno.



**Nota:** Adaptado de (Merino Rodarte, 2017).

Las alternativas presentadas para la prevención, reducción y remoción del H<sub>2</sub>S se clasifican de la siguiente forma:

Métodos físicoquímicos:

- La adsorción en diferentes materiales, membranas y/o criogenización.
- La absorción física (uso de agua o algún solvente orgánico) y absorción química (aprovechamiento de la solubilidad de H<sub>2</sub>S en agua para reaccionar con algún agente soluble en agua) (Marco, 2017).

#### Métodos alternativos:

- Dosificación de oxígeno dentro del biodigestor (oxidación del  $\text{H}_2\text{S}$  a sulfatos con eficiencia entre el 80 a 90% y/o azufre).
- Enriquecimiento del biogás (desorción del  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  dentro del biodigestor) mediante el contacto con una corriente de nitrógeno.
- Reacción de sales de hierro con  $\text{H}_2\text{S}$  para formar sulfuros de hierro (Marco, 2017).

#### Métodos biológicos:

- Uso de bacterias específicas que permitan oxidar al  $\text{H}_2\text{S}$
- Incorporar microorganismos que representan economía y son amigables con el medioambiente (Marco, 2017).

### 3. Objetivos del Macroproyecto

1. Desarrollar por síntesis verde un aditivo nano estructurado con capacidad para reducir la concentración de H<sub>2</sub>S producido en procesos de biodigestión anaerobia, a valores inferiores a los de máxima tolerancia establecida en 100 ppm en generadores dedicados a producción de energía eléctrica a partir de biogás como combustible.
2. Lograr un aditivo que cumpla con estándares de calidad en términos de sostenibilidad e inocuidad en ambiente y seres vivos, aspectos evaluados a partir del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) para las etapas de síntesis, uso, y disposición final como parte del bioabono derivado como subproducto del digestor.
3. Conseguir que el aditivo responda eficazmente en reducción de H<sub>2</sub>S para los sustratos de mayor disponibilidad en ZNI y de elevado potencial de producción de biogás, específicamente los de origen bovino, porcino, aviar y de desechos agrícolas.

#### **4. Objetivos de la Auxiliatura de Investigación**

##### **Objetivo General**

Determinar la influencia de un aditivo nano estructurado en la calidad de biogás producido en un proceso de digestión anaerobia

##### **Objetivos Específicos**

- Identificar el contenido de sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ) de biogás a partir de sustratos agrícolas sin y con aditivo nano estructurado
- Analizar el efecto del aditivo nano estructurado en la producción de biogás.

## 5. Metodología

El montaje se llevó a cabo en el laboratorio de calidad de aguas de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, bajo un método experimental que permitió identificar las relaciones que se generan entre las variables consideradas, evaluando el potencial de remoción del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), por medio de pruebas piloto con adición de nano partículas a diferentes concentraciones donde se obtuvieron resultados comparativos con pruebas sin aditivo, bajo el uso de instrumentos de medición. Los sustratos utilizados fueron recolectados en las instalaciones de la Universidad de los Llanos sede Barcelona, y se almacenaron en tres recipientes previamente rotulados (avícola, bovino y porcino).

El montaje de las incubadoras para la producción de biogás se compone por dos cavas de Icopor 35 litros, ubicando tres frascos de vidrio 1.5 litros en su interior, a los que se le realizó una adaptación en la base para ser conectados a los motores que funcionan a 110V con 5 a 6 revoluciones por minuto y las aspas para la agitación continua fueron modificadas con aletas de 1cm x 1cm de ancho. Las incubadoras se encuentran conformadas por una entrada (alimentación) y una salida denominada (purga), seguido a esto, para regular la temperatura se les instaló un termostato que contiene sensores que permiten regular la temperatura entre un rango de (39-40°C) y para que el calor generado no derrita la estructura de icopor, se le adicionó a las paredes de la cava una cinta térmica de aluminio que aísla la temperatura generado en el sistema. En la preparación del inóculo activo, se prepararon 5 litros de una mezcla 1:7 de excretas bovinas y agua (625 g de sustrato y 4, 375 ml de agua) de los cuales inicialmente se depositaron 2 litros al reactor y los 3 litros resultantes fueron añadidos cada tres días de a 500 ml al reactor tipo batch de agitación

continua. La Universidad Pontificia Javeriana envió la muestra de aditivo nano estructurado de hierro que fue usado con cada sustrato en los seis mini reactores.

Finalmente se dividieron los sustratos y se realizaron dieciocho mezclas de 300 ml a 1:7 seis de excretas avícolas, seis bovinas y seis porcinas de (37,5 g de sustrato y 262,5 ml de agua) cada una y 200 ml de inóculo activo para evaluar la producción de biogás y la reducción de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ). Los mini reactores se denominaron (M1, M2, M3, M4, M5 y M6). Los frascos M1 y M4 se establecieron como (blancos) ya que no se le añadió aditivo nano estructurado, mientras que al resto de los frascos M2, M3, M5 y M6 se les añadió una concentración de 50 ml para 10 ppm, 5 ml para 100 ppm, 1 ml para 500 ppm y 0,5 ml para 1.000 ppm como se muestra en la *Tabla 10*.

### **Fase 1. Caracterización del sustrato**

En esta fase se tomaron las muestras de cada sustrato para realizar los análisis considerados: sólidos totales (SST), sólidos volátiles (SV), conductividad y pH. Como primera actividad se tomaron 30 g de cada sustrato a los cuales se les midió el porcentaje de sólidos totales y sólidos volátiles presentes en cada uno (avícola, bovino y porcino) por medio del método gravimétrico, las muestras fueron introducidas en el horno de secado a 105°C por tres horas hasta no tener humedad. Luego de pesar cada muestra, se retiraron 5g en un crisol para llevarlo a la mufla a 510°C por una hora hasta obtener la ceniza de cada sustrato y determinar por medio del peso final el porcentaje de sólidos volátiles presentes en la muestra y tomar el pH con ayuda de un multiparámetro.

**Tabla 1.** *Parámetros fisicoquímicos de los sustratos avícola, bovino y porcino.*

Parámetros fisicoquímicos	Sustrato			Método	Equipo
	Avícola	Bovino	Porcino		
Sólidos totales	x	x	x	Gravimetría	Horno de secado
Sólidos volátiles	x	x	x	Gravimetría	Mufla
Conductividad	x	x	x	Potenciometría	Multiparámetro
pH	x	x	x	Potenciometría	Multiparámetro

## Fase 2. Montaje de los Reactores pilotos en el laboratorio

Para esta fase se utilizaron seis reactores tipo batch de 1,5 L, a los cuales se les agregaron 200 ml de bacterias anaerobias (inóculo) de un biodigestor activo y 300 ml de sustrato líquido de origen agrícola iniciando con el avícola, seguido porcino y finalizando con bovino. Inicialmente se ubicaron las dos incubadoras con los seis mini reactores en su interior cerca de una tomacorriente para posteriormente conectarlas y verificar que el movimiento fuera continuo, seguido a esto, se procedió a identificar la cantidad de aditivo nano estructurado de hierro necesario según la concentración de partes por millón (ppm) de cada una de los sustratos. Una vez verificado, se procedió a verter cada una de las mezclas y la concentración de nano partículas para cada reactor, inspeccionando que el sistema estuviera completamente sellado y en agitación continua para dar inicio a la producción de biogás.

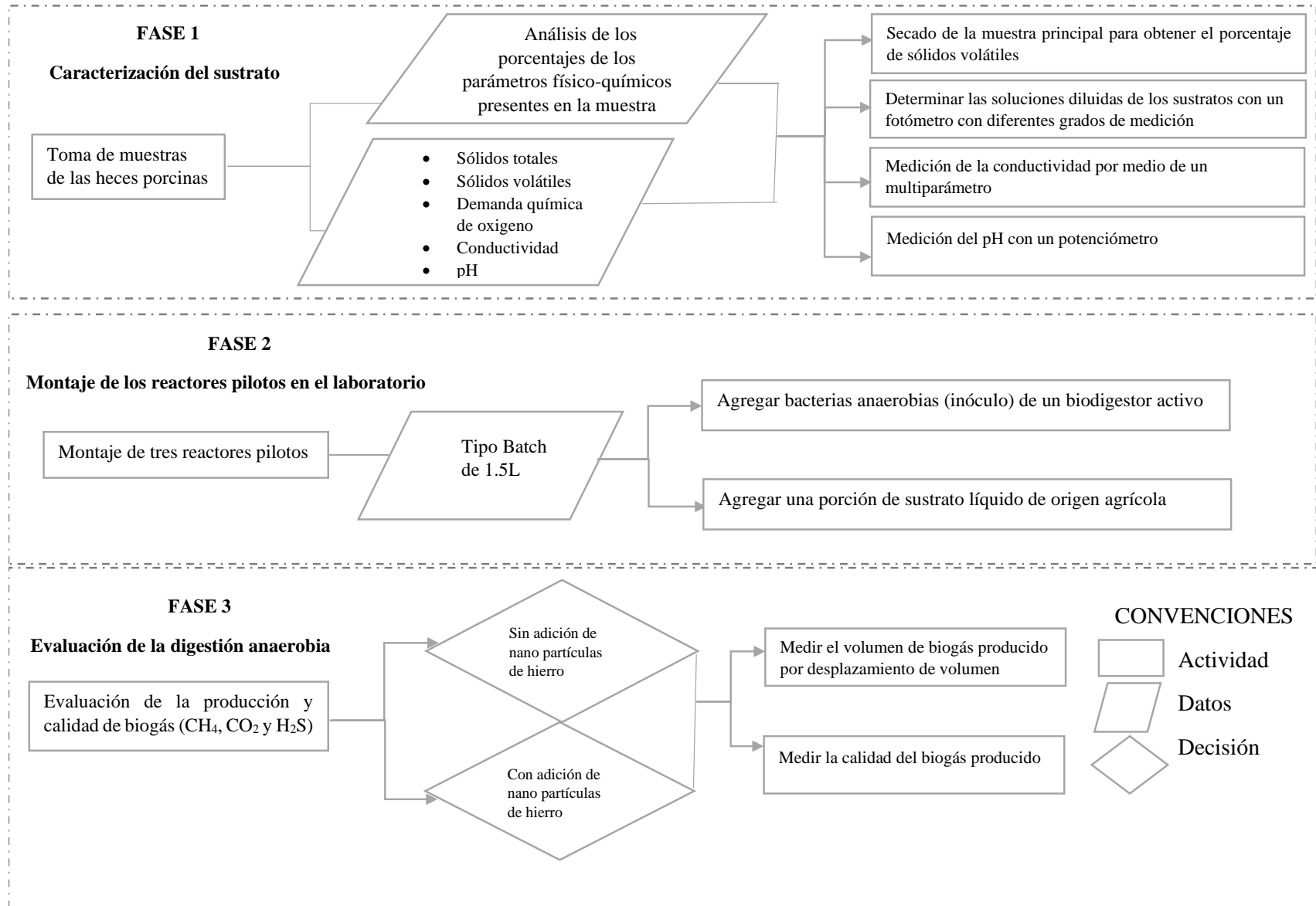
Luego de instalar correctamente el montaje de las incubadoras, se procedió a conectar en cada una de las salidas de purga de cada reactor una manguera hasta la parte superior de la incubadora en donde se tenían instalados tres vasos de precipitado de 500 ml y tres tubos de ensayo de 250 ml llenos con agua hasta el límite de 400 ml para ser introducido en sentido contrario en el vaso de precipitado, con el fin de medir el desplazamiento del agua generado por la producción de biogás de cada sustrato utilizado. Las mediciones fueron tomadas día a día, verificando desde la

marca inicial donde quedaba el agua hasta el valor al que decencia al pasar cada día. Adicionalmente, las mediciones se realizaron con ayuda del equipo de medición portátil (K-600 Bosenar Electronic Technology Co., Ltd) que registraba el nivel de metano ( $\text{CH}_4$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), identificando el límite inferior de explosividad (%LEL) y los niveles iniciales de concentración de los gases en partes por millón (ppm) para ser analizados.

### **Fase 3. Evaluación de la digestión anaerobia**


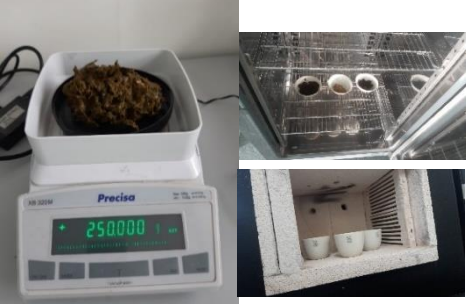


En esta fase se evaluó la calidad y producción de biogás ( $\text{CH}_4$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ) con y sin el aditivo nano estructurado de hierro. Inicialmente se midió el desplazamiento de volumen de gas con las mangueras de cada reactor, usando un vaso de precipitado y un tubo de ensayo lleno de agua, el cual fue sumergido al contrario para luego insertar cada una de las mangueras y verificar los niveles de gas producidos según el desplazamiento que se tuviera diariamente. Seguido a esto, se conectó cada manguera al conducto del medidor de gas portátil K600 de la marca Henan Bosenar Electronic Technology Co, para conocer los niveles producidos de metano y sulfuro de hidrogeno presente en el biogás generado.

**DIAGRAMA METODOLÓGICO**



**6. Resultados y Análisis**

**Tabla 2. Materiales y equipos**










Tipo	Materiales	Equipos	Imagen
<b>Montaje del reactor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 cavas de 35L</li> <li>• 6 frascos de vidrio 1.5L</li> <li>• Cinta térmica de aluminio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 6 motores 110V</li> <li>• 6 aspas 1x1</li> <li>• 1 termostato</li> </ul>	
<b>Dosificación de sustratos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 6 vasos de precipitado</li> <li>• 1 espátula</li> <li>• 1 agitador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bascula digital</li> <li>• Horno de secado</li> <li>• Mufla</li> </ul>	
<b>Dosificación de nano partículas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 pipeta pasteur</li> <li>• 1 jeringa 5ml</li> </ul>	N/A	
<b>Medición de producción de biogás</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 6 tubos de ensayo</li> <li>• 6 mangueras de ¼ pulgada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 medidor de biogás portátil K600 Bosenar Electronic</li> <li>• 1 multiparámetro</li> </ul>	

**Fase 1. Caracterización del sustrato**

Se definieron los parámetros y variables de las ecuaciones necesarias para la determinación de sólidos totales, sólidos volátiles, demanda química de oxígeno, conductividad y pH. Se pesaron 30 g de cada uno de los sustratos y se introdujeron en el horno de secado a 105°C por tres horas

para eliminar la humedad presente en cada una de las muestras, luego de completar el tiempo, se procedió a pesar la muestra final para obtener el valor de los sólidos totales presentes en cada sustrato:

**Tabla 3.** Registro de los datos obtenidos para determinar los sólidos totales.

Sustrato	Peso inicial	Tiempo de secado (3 horas a 105°C)	Peso final
Bovino			
Codorniz			
Porcino			

A continuación se definen las ecuaciones utilizadas para calcular los valores de los sólidos totales y solidos volátiles presentes en los sustratos utilizados para la producción de biogás (vaca, codorniz y cerdo).

Primero se calculó el peso de los sólidos totales del estiércol a partir de la siguiente ecuación:

**Ecuación 1.** *Determinación de sólidos totales*

$$St = Wr - Wc$$

$$St_{\text{bovino}} = 114.1472g - 106.9924g$$

$$St = 7.1548g$$

$$\%St = \frac{St * 100}{Wm}$$

$$\%St = \frac{7.1548g * 100}{30}$$

$$\%St = 23.84\%$$

Dónde:

Wc: Peso del crisol

Wr: Peso total del estiércol

ST: Sólidos totales presentes en el estiércol.

Wm: Peso de la muestra inicial

**Tabla 4.** *Contenido de sólidos totales en los tres sustratos (bovino, codorniz y porcino).*

Sólidos totales			
Peso inicial	Peso crisol	Peso final	Sólidos totales
30g bovino	106.9924g	114.1472g	7.1548g
30g codorniz	105.1814g	114.0233g	8.8419g
30g porcino	111.2716g	121.9016g	10.63g

Para calcular los sólidos volátiles del estiércol, se calcino en un horno mufla el residuo seco de los sólidos totales previamente analizados.

**Ecuación 2.** *Determinación de sólidos volátiles*

$$W_{sv} = \frac{\%sv}{\%st}$$

Dónde:

Wsv: Peso de los sólidos volátiles en el estiércol

% sv: Porcentaje de solidos volátiles en el estiércol

% st: Porcentaje de residuo total seco del estiércol

Una vez obtenido el residuo seco de los sólidos totales de las muestras, se pesaron 2g de cada sustrato en tres crisoles que fueron enviados al horno mufla a 510°C por una hora para finalmente obtener el peso final de los sólidos volátiles presentes en cada sustrato:

**Tabla 5.** *Registro de los datos obtenidos para determinar los sólidos volátiles.*

Sustrato	Peso inicial	Tiempo de secado (1 hora a 510°C)	Peso final
Bovino			
Codorniz			

**Tabla 5. Continuación**



**Tabla 6. Contenido de sólidos volátiles en los tres sustratos (bovino, codorniz y porcino).**

Sólidos volátiles			
Peso inicial	Peso crisol	Peso final	Sólidos volátiles
5g bovino	23.0883g	19.4335g	73.09%
5g codorniz	22.0624g	17.4329g	92.59%
5g porcino	20.5586g	18.6338g	58.49%

**Tabla 7. Parámetros químicos de los sustratos (bovino, codorniz y porcino).**

Sustrato	Conductividad Inicia mS/cm	pH Inicial	Conductividad Final mS/cm	pH Final
Bovino	1.578	7.80	2.148	7.91
Codorniz	2.601	6.90	8.362	7.3
Porcino	1,805	10,86	2.394	8.79

**Fase 2. Montaje de los reactores pilotos en el laboratorio**

Seguido a la verificación de las características de los mini reactores frente al movimiento continuo, temperatura y producción de biogás, se establecieron las concentraciones del aditivo nano estructurado de hierro necesarias para cada sustrato (avícola, bovino y porcícola), en donde se obtuvieron los siguientes valores:

**Ecuación 3. Concentración de aditivo nanoestructurado de hierro**

$$\frac{Vst}{VAd} = CAd$$

$$CAd = \frac{500ml}{10ppm}$$

$$CAd = 50ml$$

Dónde:

Vst: Volumen de sustrato

Vad: Volumen del aditivo nano estructurado en ppm

Cad: Concentración de aditivo

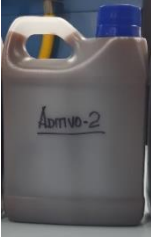
**Tabla 8.** *Concentración de aditivo nano estructurado para los tres sustratos (bovino, codorniz y porcino).*

Concentración	10 ppm	100 ppm	500 ppm	1000 ppm
Aditivo	50 ml	5 ml	1 ml	0,5 ml

El aditivo nano estructurado cuenta con 5g/l de nano partículas, compuestas por una concentración de 13,8 g/l partículas de hierro.

Las características de las concentraciones del aditivo nano estructurado que han sido añadidos a los mini reactores se especifican a continuación:

**Tabla 9.** *Características del aditivo nano estructurado de hierro.*

Aditivo	Imagen	Característica
Aditivo nano estructurado de hierro		El aditivo nano estructurado de hierro número dos, se decanta parcialmente, por lo que se sugiere dejarlo bien tapado para que no se vaya a oxidar. Se observa un líquido total amarillento y la concentración de aditivo en la parte inferior del frasco que lo contiene. Se recomienda agitar antes de usar.

**Fase 3. Evaluación de la digestión anaerobia**

Finalizando la toma de datos de la producción de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) según cada sustrato, se procedió analizar cada uno de los valores, identificando si al adicionar el aditivo nano estructurado de hierro en concentraciones (50 ml, 5 ml, 1 ml y 0,5 ml) en cada mini reactor, se evidenciaba una reducción en los niveles de concentración del sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) en cada sustrato (bovino, porcino y avícola (Codorniz))

A continuación se presentan los resultados obtenidos frente a la producción de biogás y las concentraciones iniciales de metano (CH<sub>4</sub>) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S):

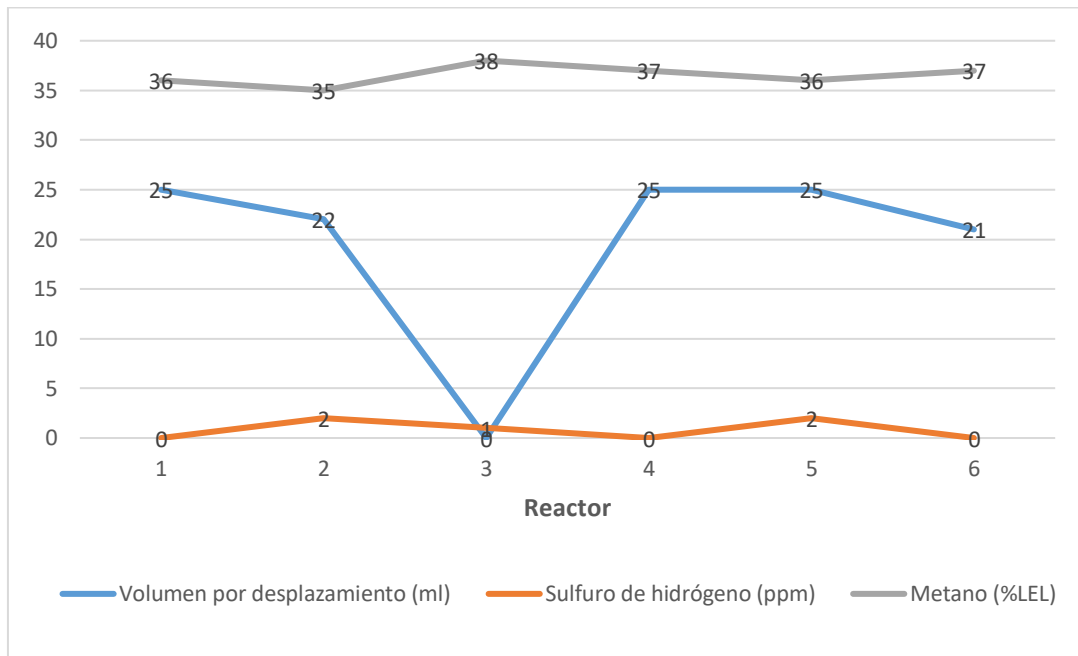
**Producción de biogás a partir de excretas porcinas:** El tiempo establecido inicialmente para la toma de datos fue de 12 días, donde los primeros 7 días se obtuvieron valores de producción de (H<sub>2</sub>S) oscilaban entre 0 y 11 partes por millón.

**Tabla 10.** Resultados de la producción de biogás a partir de excretas porcinas.

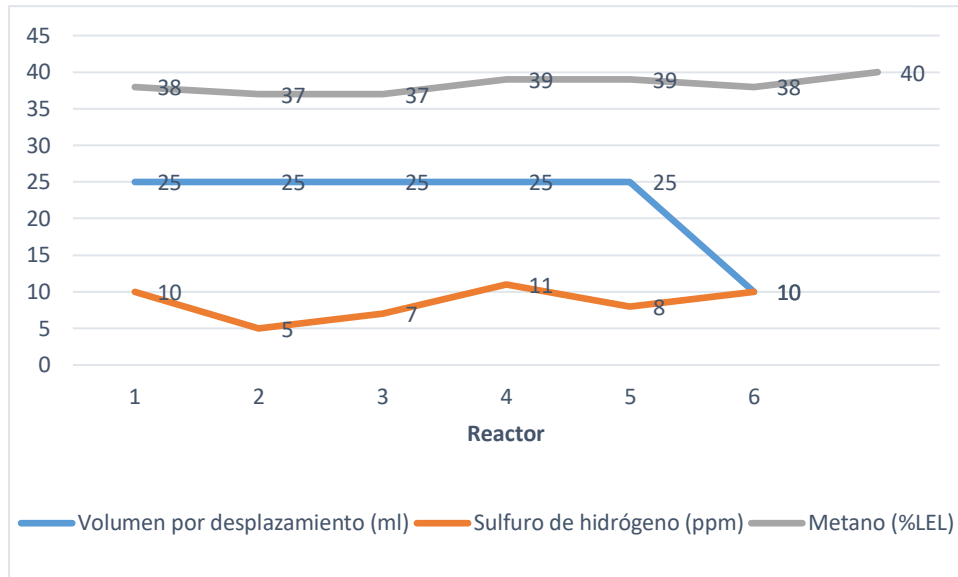
Día	Temperatura		Reactor	Volumen por desplazamiento (ml)	Metano (CH <sub>4</sub> ) (%LEL)	Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S) (PPM)
25-may-22	39°C	40°C	1	25	36	0
			2	22	35	2
			3	0	38	1
			4	25	37	0
			5	25	36	2
			6	21	37	0
26-may-22	39.5°C	40.1 °C	1	25	38	10
			2	25	37	5
			3	25	37	7
			4	25	39	11
			5	25	39	8
			6	10	38	10
27-may-22	39.5°C	40.5°C	1	25	40	1
			2	20	41	2
			3	25	42	2
			4	25	41	1
			5	25	42	2
			6	5	41	8
31-may-22	39.8°C	40.3°C	1	25	41	0
			2	0	41	0
			3	0	42	0
			4	25	40	0
			5	25	40	0
			6	0	41	0
1-jun-22	39.5°C	40.5°C	1	25	40	1
			2	9	40	0
			3	18	42	0
			4	25	41	1
			5	25	40	5
			6	7	41	8
2-jun-22	39.5°C	40.4°C	1	25	40	9
			2	9	40	4
			3	0	42	6
			4	25	41	10
			5	25	40	8
			6	9	42	10

**Tabla 10. Continuación**

3-jun-22	39.5°C	40.1°C	1	25	41	0
			2	15	42	0
			3	0	41	0
			4	25	40	0
			5	25	41	0
			6	6	41	0
6-jun-22	39.5°C	40.7°C	1	25	41	0
			2	5	42	0
			3	0	41	0
			4	25	40	0
			5	25	41	0
			6	25	41	0
7-jun-22	39.5°C	40.7°C	1	25	42	0
			2	2	42	0
			3	0	41	0
			4	25	42	0
			5	25	41	0
			6	25	42	0
8-jun-22	39.3°C	40.8°C	1	25	39	0
			2	25	40	0
			3	14	39	0
			4	25	41	0
			5	25	39	0
			6	25	39	9
9-jun-22	39.7°C	40.2°C	1	25	38	0
			2	10	37	0
			3	0	36	0
			4	25	37	0
			5	25	36	0
			6	13	36	8
10-jun-22	39.4°C	40.2°C	1	25	38	0
			2	7	37	0
			3	13	36	0
			4	25	37	0
			5	25	36	0
			6	12	36	0

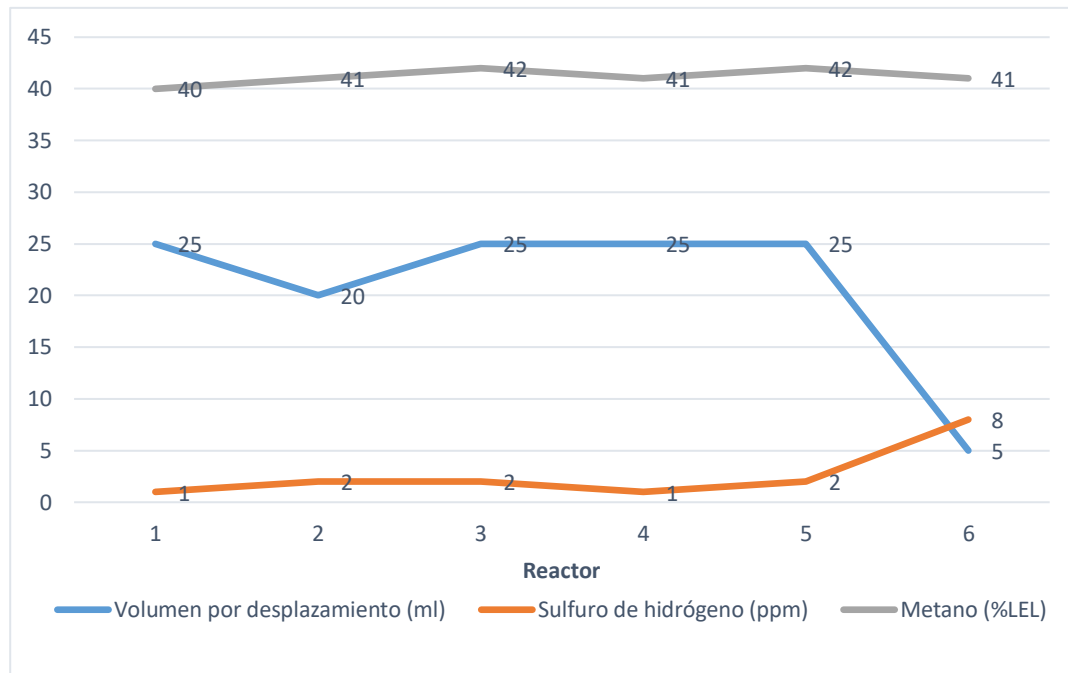
**Figura 2.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas porcinas (25-mayo-2022)

Los valores de producción de biogás a partir de excretas porcinas inicialmente fueron muy bajos, el valor de los blancos (reactor 1 y reactor 4) fue de 0 ppm. La producción diaria de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) puede variar según el tipo de sustrato, teniendo en cuenta que el análisis es experimental y no se tienen valores fijos. Los valores de producción de ( $H_2S$ ) en los reactores 2, 3, 5 y 6 fueron de 2, 0, 2 y 0 ppm. La producción de metano se encuentra entre (35 y 38 %LEL) límite inferior de explosividad. El volumen por desplazamiento tuvo una reducción significativa en el reactor 3 con un valor de 0 ml.

**Figura 3.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas porcinas (26-mayo-2022)

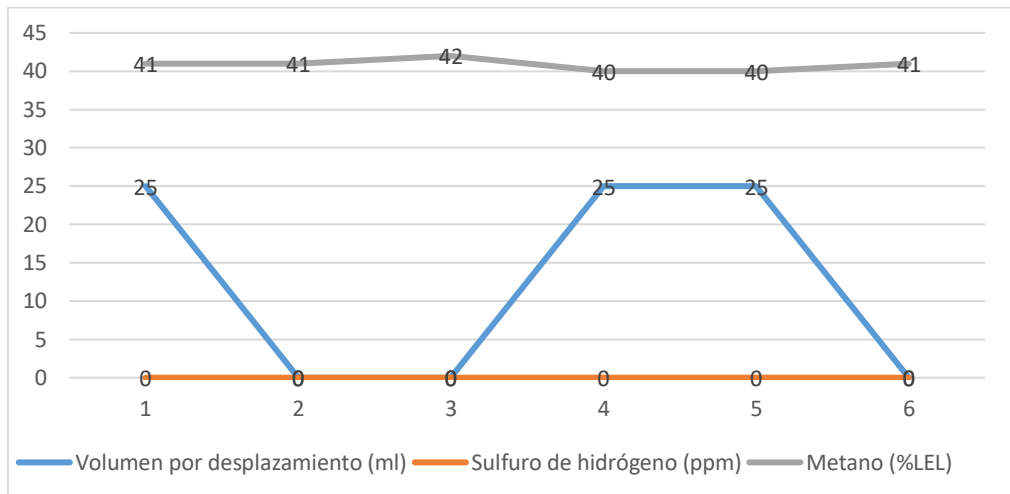
De acuerdo con la Figura 3, se determinó que la efectividad del aditivo de hierro cumple con el objetivo de reducir los niveles de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), teniendo en cuenta que los valores disminuían en función de la cantidad de aditivo añadido en cada reactor. Como se evidencia que en el reactor 1 y 4 (blanco) el valor inicial es de 10 y 11 ppm, indicando un valor elevado de ( $H_2S$ ) y al adicionar 50 ml de nano partículas en el reactor 2, el valor se redujo a la mitad (5 ppm), seguido al reactor 3 al que se le añadió 10 ml de nano partículas y su valor semejó al valor inicial del blanco (7 ppm). Indicando que el uso de nano partículas en mayor cantidad favorece la reducción en los niveles de  $H_2S$  en comparación con los valores de los blancos. El volumen por desplazamiento se mantuvo constante en excepción al reactor 6 que tuvo una reducción significativa al pasar de 25ml a 10ml. La producción de metano se encuentra entre (37 y 39%LEL) límite inferior de explosividad.

**Figura 4.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas porcinas (27-mayo-2022)



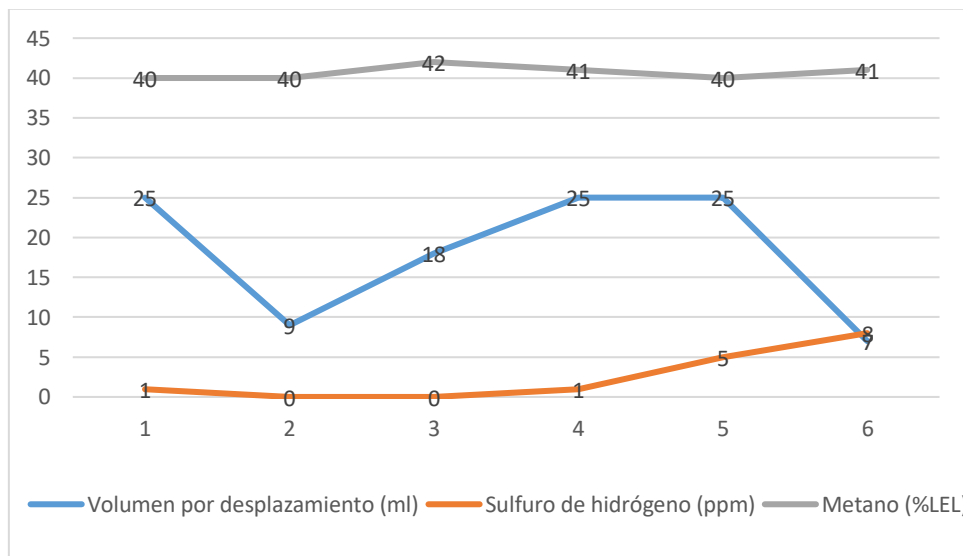
Los valores de producción de sulfuro de hidrógeno reflejan similitud según la concentración de nano partículas de hierro, como se observa en la Figura 3, el valor de los blancos (reactor 1 y 4) fue de 1ppm a comparación con el reactor 6 que fue el único que sobrepaso los niveles del blanco con una producción de 8ppm. Los valores de metano arrojados aumentaron de (40 a 42 %LEL) límite inferior de explosividad. El volumen de desplazamiento disminuyo 5ml en el reactor 2 y se redujo drásticamente en el reactor 6 con un valor final de 5ml.

**Figura 5.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas porcinas (31-mayo-2022)



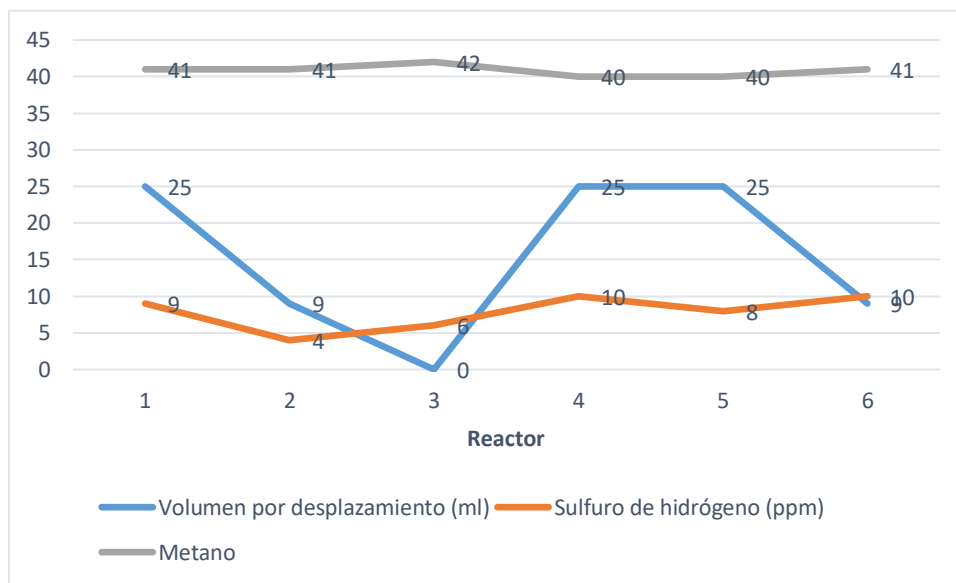
En la Figura 5 se observa una reducción total de la producción de (H<sub>2</sub>S), ya que los datos obtenidos fueron de 0 ppm para todos los reactores. El desplazamiento de volumen se dio en su totalidad en los reactores 2, 3 y 6. Los datos de metano continúan con un porcentaje de (40 a 42 %LEL) límite inferior de explosividad.

**Figura 6.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas porcinas (1-junio-2022)



Según la Figura 6, el valor de los blancos (reactor 1 y 4) fue de 1 ppm a comparación con los reactores 5 y 6 que superan la producción de sulfuro de hidrógeno con valores de 5 ppm y 8 ppm, se tiene en cuenta que la concentración de nano partículas de hierro fue de 1 ml para el reactor 5 y 0,5 ml para el reactor 6, precisando la relación que existe entre la concentración de nano partículas suministradas y la efectividad en cuanto a la reducción de los valores iniciales de (H<sub>2</sub>S), como se observa en los reactores 2 y 3 que son los que mayor concentración de aditivo contienen (50 ml y 10 ml) la reducción de (H<sub>2</sub>S) es total. El desplazamiento de volumen descende en los reactores 2, 3 y 6. La producción de metano se da continuamente de (40 a 42%LEL) límite inferior de explosividad.

**Figura 7.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas porcinas (2-junio-2022)



Teniendo en cuenta que el análisis de resultados se basa es un estudio experimental, según en la Figura 7 se observa el incremento en la producción de sulfuro de hidrógeno en los blancos (1 y 4) con un valor de 9 ppm para el reactor 1 y 10 ppm para el reactor 4, indicando la efectividad que se produce en torno a la relación proporcional de concentración de nano partículas en el reactor

2 y 3, donde la producción de (H<sub>2</sub>S) se redujo bastante, con un valor de 4 ppm y 6 ppm. Diferente a los niveles de los reactores 5 y 6, en donde sus niveles se asemejan al nivel del blanco, indicando que al añadir menor cantidad de nano partículas, se obtiene una reducción muy mínima y el valor se asemeja al valor inicial de los blancos. El desplazamiento de volumen de gas se genera considerablemente en los reactores 2, 3 y 6. La producción de metano continua con niveles de (40 a 42%LEL) límite inferior de explosividad.

**Producción de biogás a partir de excretas avícolas (Codorniz):** Se consideró el tiempo de 12 días establecido inicialmente para la toma de datos, donde los primeros 7 días se obtuvieron valores de producción de (H<sub>2</sub>S) que oscilaban entre 0 y 18 partes por millón.

**Tabla 13.** Resultados de la producción de biogás a partir de excretas avícolas (Codorniz)

Día	Temperatura		Reactor	Volumen por desplazamiento (ml)	Metano (CH <sub>4</sub> ) (%LEL)	Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S) (PPM)
14-jun-22	40.4°C	40.5°C	1	25	37	18
			2	20	38	11
			3	0	39	13
			4	25	40	17
			5	25	41	14
			6	0	38	16

**Tabla 13. Continuación**

15-jun-22	40.4°C	40.5°C	1	25	36	13
			2	0	37	5
			3	0	39	8
			4	25	40	14
			5	25	41	10
			6	0	38	12
16-jun-22	40.3°C	40.5°C	1	25	37	15
			2	0	38	4
			3	0	39	11
			4	25	39	15
			5	25	40	12
			6	0	37	13
17-jun-22	39.5°C	40.1°C	1	25	40	8
			2	0	41	0
			3	0	42	0
			4	25	40	11
			5	25	41	4
			6	9	42	10

**Tabla 13. Continuación**

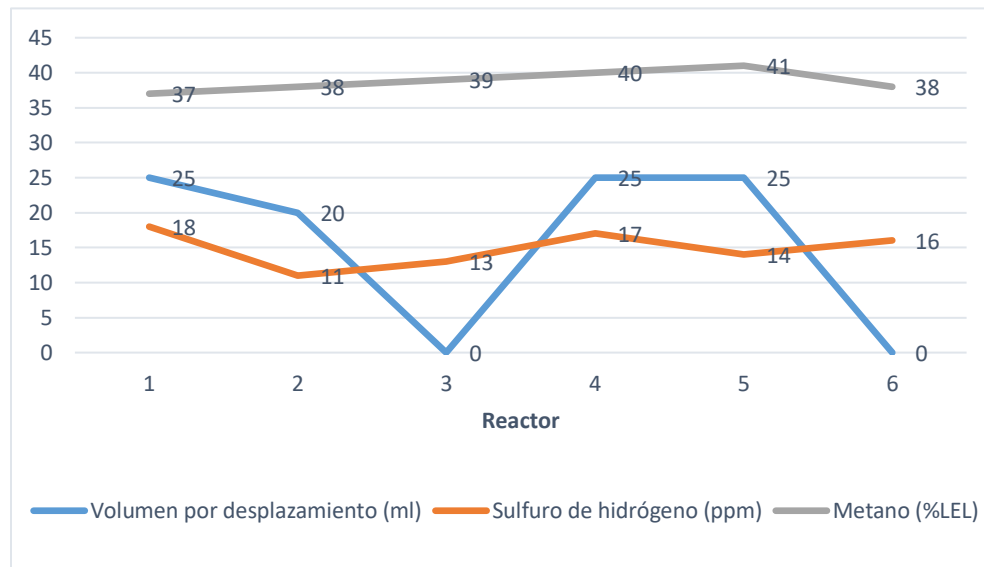
20-jun-22	39.5°C	40.5°C	1	25	41	1
			2	9	42	0
			3	18	43	0
			4	25	41	1
			5	25	42	5
			6	7	43	8
21-jun-22	39.5°C	39.6°C	1	25	41	0
			2	0	42	0
			3	0	43	0
			4	25	41	0
			5	25	42	0
			6	6	43	16
22-jun-22	39.2°C	39.4°C	1	25	43	0
			2	0	44	0
			3	0	44	0
			4	25	43	0
			5	25	44	0
			6	25	45	14

**Tabla 13. Continuación**

23-jun-22	39.2°C	40.2°C	1	25	41	0
			2	17	42	0
			3	0	43	0
			4	25	41	0
			5	25	42	0
			6	25	43	11
24-jun-22	39.2°C		1	25	42	0
			2	25	41	0
			3	0	44	0
			4	25	43	0
			5	25	42	0
			6	25	43	4
28-jun-22	27.1°C	39.6°C	1	25	40	0
			2	25	40	0
			3	0	41	0
			4	25	39	0
			5	25	39	0
			6	25	40	0

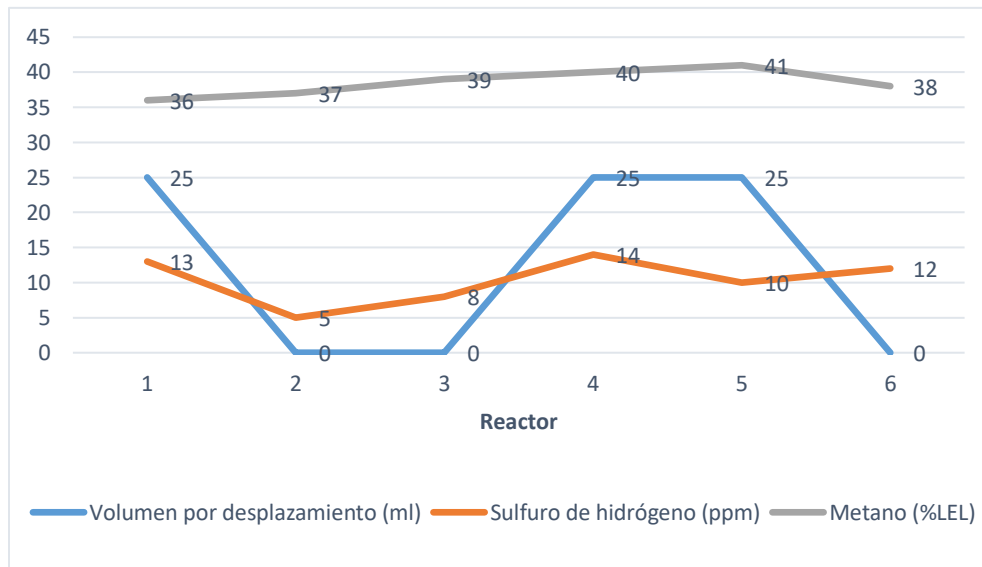
**Tabla 13. Continuación**

29-jun-22	27.2°C	39.8°C	1	25	39	0
			2	25	38	0
			3	0	37	0
			4	25	37	0
			5	25	36	0
			6	25	38	0
30-jun-22	27.1°C	39.6°C	1	25	37	0
			2	25	37	0
			3	0	36	0
			4	25	36	0
			5	25	35	0
			6	25	35	0

**Figura 8.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas avícolas (14- junio-2022)

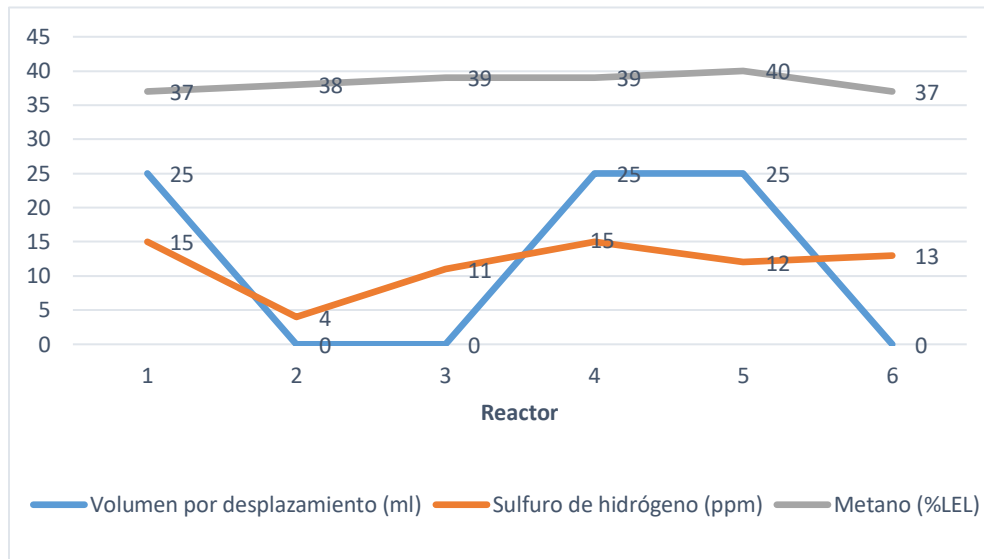
Como se observar en la Figura 8, el valor de la producción de biogás en los blancos (reactor 1 y 4) fue de 18 ppm y 17 ppm, al añadir la concentración de nano partículas en los reactores 2, 3, 5 y 6 se puede identificar la reducción de los niveles de producción de ( $H_2S$ ), ya que los valores se reducen según el nivel de concentración del aditivo como en el caso del reactor 2 el cual tiene 50ml de nano partículas de hierro y su valor de ( $H_2S$ ) es de 11ppm, permitiendo entender que a mayor cantidad de aditivo nano estructurado, mayor reducción en los niveles de ( $H_2S$ ) en cada reactor. El movimiento por desplazamiento del gas se redujo en su totalidad en el reactor 3 y 6. Los niveles de metano se mantienen entre (37 y 41 %LEL) límite inferior de explosividad.

**Figura 9.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas avícolas (15- junio-2022)

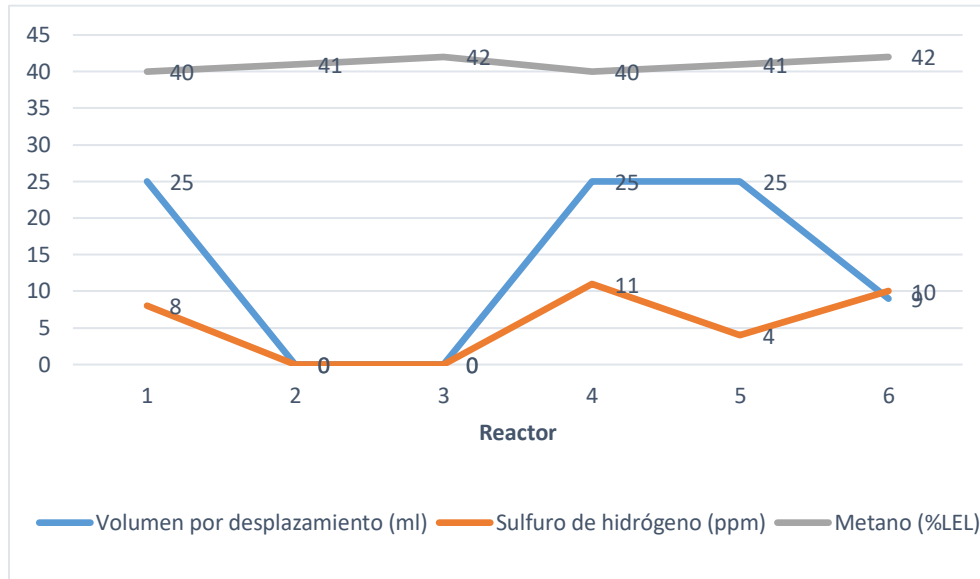


Teniendo en cuenta la relación que existe entre la concentración de nano partículas y la reducción de los niveles de sulfuro de hidrógeno, la Figura 9 permite analizar los niveles iniciales del blanco (reactor 1 y 4) de 13 ppm y 14 ppm. El reactor 2 contiene una concentración de 50 ml de aditivo, el valor de (H<sub>2</sub>S) es de 5 ppm, seguido al reactor 3 que tiene una concentración de 10 ml de aditivo y su nivel de (H<sub>2</sub>S) es de 8 ppm, aclarando que la reducción del porcentaje de sulfuro de hidrógeno está estrechamente relacionada con la concentración de aditivo nano adicionado, ya que aunque se genere desplazamiento de volumen en la producción de biogás, la generación de (H<sub>2</sub>S) sigue activa como se observa en el reactor 6, donde la concentración de aditivo fue de 0,5 ml y el valor de sulfuro de hidrógeno se asemejó al nivel del blanco con un valor de 12 ppm. El desplazamiento de volumen de gas se reduce en su totalidad en los reactores 2, 3 y 6. Los niveles de metano se mantienen entre (36 y 41 %LEL) límite inferior de explosividad.

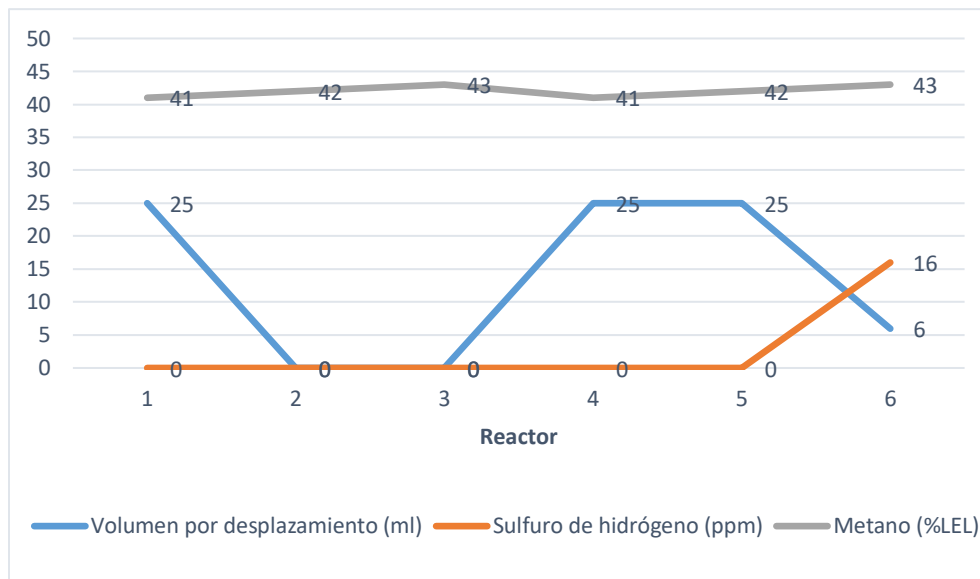
**Figura 10.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas avícolas (16- junio-2022)



Efectivamente al pasar de los días, los valores de producción de sulfuro de hidrógeno siguen disminuyendo en los reactores con mayor concentración de nano partículas, como se observa en la Figura 10, los niveles del reactor 2 que contiene la mayor concentración de aditivo (50 ml) siguen disminuyendo, en comparación con los demás reactores, donde la concentración de aditivo es mucho menor y los valores de producción de (H<sub>2</sub>S) se asemejan al valor inicial de los blancos de referencia 15 ppm. Los valores del metano se mantienen entre (37 y 40 %LEL) límite inferior de explosividad. El volumen por desplazamiento de gas se redujo en su totalidad en los reactores 2,3 y 6.

**Figura 11.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas avícolas (17- junio-2022)

Siguiendo con las mediciones, en la Figura 11 se observa la reducción total de los niveles de sulfuro de hidrógeno en los reactores 2 y 3, los blancos de referencia (reactor 1 y 4) siguen produciendo ( $H_2S$ ) con valores de 8 ppm y 11 ppm y los reactores 5 y 6, mantienen valores de ( $H_2S$ ) similares a los de los blancos de referencia con niveles de producción de 4 ppm y 10 ppm. Los valores de metano se metano se mantienen entre (40 y 42 %LEL). El movimiento por desplazamiento de gas se redujo en su totalidad en los reactores 2 y 3.

**Figura 12.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas avícolas (20- junio-2022)

La Figura 12 permite observar el volumen por desplazamiento que ha tenido cada reactor y consigo la producción de sulfuro de hidrógeno, como se observa en los reactores 2 y 3, la producción de ( $H_2S$ ) es de 0 ppm y el valor de los blancos de referencia disminuye notablemente al pasar de 8ppm el día 19 de junio a estar en 1ppm el 20 de junio. La producción de ( $H_2S$ ) se mantiene en los reactores 5 y 6 con niveles de 5 ppm y 8 ppm. Los valores de metano se mantienen entre (41 y 43 %LEL) límite de inferior de explosividad.

Finalizando los 12 días de toma de resultados, se especifica que por 3 días consecutivos no se obtuvieron niveles de producción de sulfuro de hidrógeno en ninguno de los reactores 0ppm, razón por la cual se continúa con la toma de datos del siguiente sustrato (bovino).

**Tabla 14.** Resultados de la producción de biogás a partir de excretas por bovino

Día	Temperatura		Reactor	Volumen por desplazamiento (ml)	Metano (CH <sub>4</sub> ) (%LEL)	Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S) (PPM)
4-jul-22	39.2 °C		1	25	39	10
			2	25	41	6
			3	25	40	8
			4	25	40	11
			5	25	41	12
			6	25	42	14
5-jul-22	27.2°C	39.8°C	1	25	40	10
			2	25	42	5
			3	25	42	8
			4	25	42	12
			5	25	41	13
			6	25	41	11
6-jul-22	27.2°C	39.8°C	1	25	41	6
			2	23	42	3
			3	25	42	5
			4	25	42	6
			5	25	42	8
			6	0	41	10

**Tabla 14. Continuación**

7-jul-22	27.2°C	39.8°C	1	25	41	4
			2	21	43	0
			3	0	44	0
			4	25	43	5
			5	25	42	5
			6	0	41	10
8-jul-22	27.2°C	39.8°C	1	25	41	2
			2	20	43	0
			3	0	44	0
			4	25	43	1
			5	0	42	4
			6	25	41	6
9-jul-22	27.2°C	39.8°C	1	25	43	2
			2	25	45	1
			3	0	46	0
			4	25	46	1
			5	25	45	3
			6	0	44	4

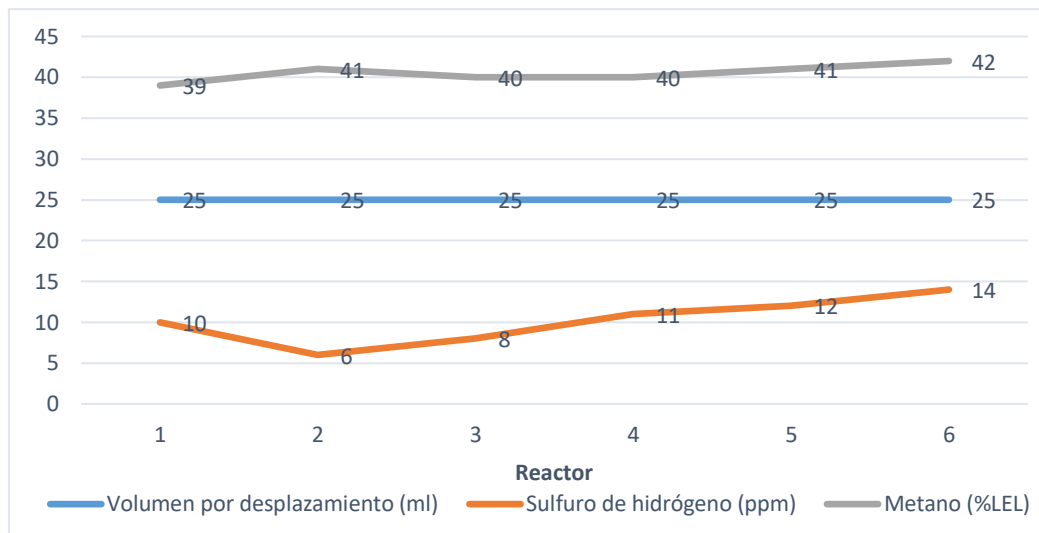
**Tabla 14. Continuación**

10-jul-22	27.1°C	39.6°C	1	25	43	1
			2	0	45	1
			3	20	46	1
			4	25	46	1
			5	25	45	2
			6	23	44	2
11-jul-22	27.1°C	39.6°C	1	25	44	1
			2	0	43	0
			3	25	43	0
			4	25	44	1
			5	25	45	2
			6	21	42	2
12-jul-22	27.1°C	39.6°C	1	25	43	0
			2	25	45	0
			3	25	46	0
			4	25	46	0
			5	25	45	0
			6	18	44	0

**Tabla 14. Continuación**

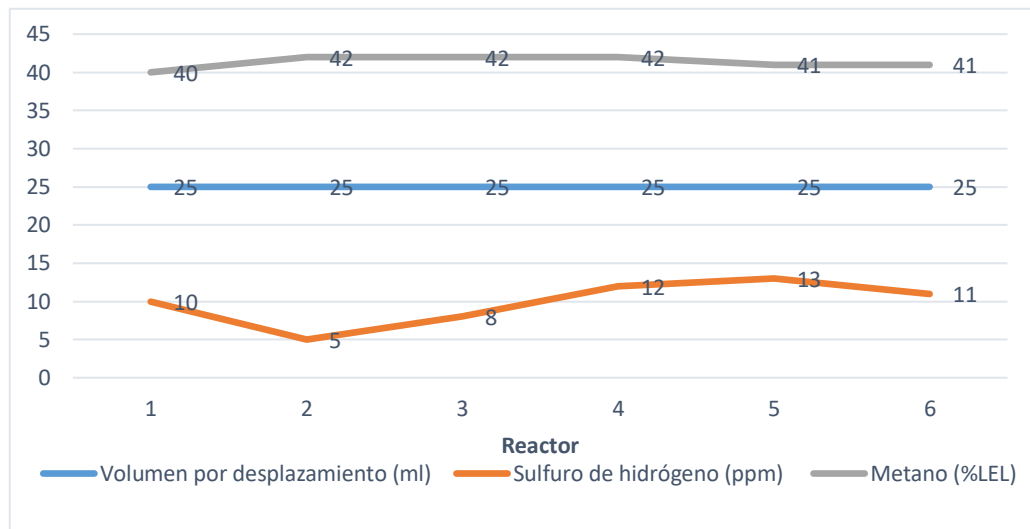
13-jul-22	27.1°C	39.6°C	1	25	43	0
			2	0	41	0
			3	25	45	0
			4	25	46	0
			5	25	45	0
			6	9	42	0
14-jul-22	27.1°C	39.6°C	1	25	41	0
			2	25	42	0
			3	25	42	0
			4	25	43	0
			5	25	43	0
			6	0	41	0
15-jul-22	27.1°C	39.6°C	1	25	40	0
			2	25	41	0
			3	25	41	0
			4	25	42	0
			5	25	43	0
			6	0	41	0

**Figura 13.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas bovino (04- julio-2022)



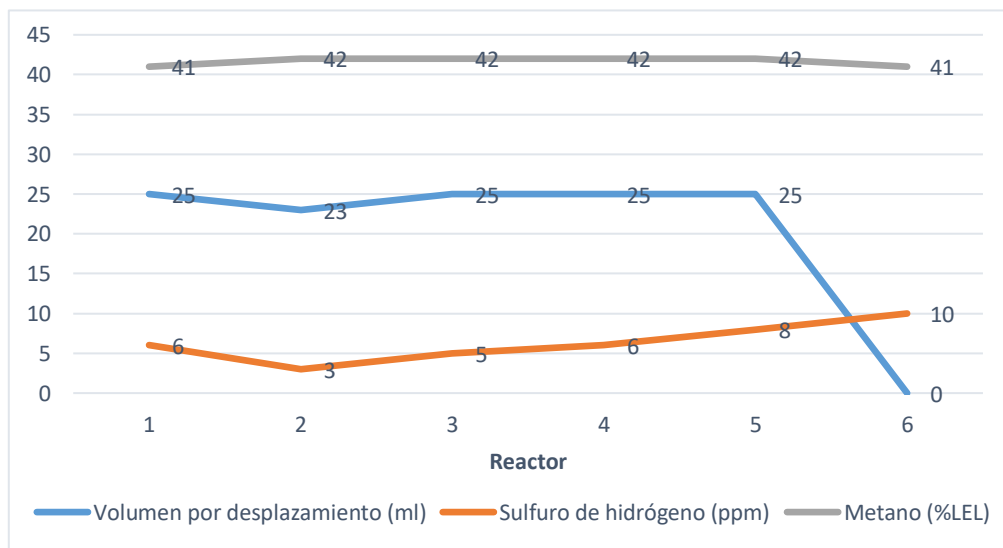
Los valores de producción de biogás a partir de excretas bovinas inicialmente fueron muy altos, el valor de los blancos (reactor 1 y reactor 4) fueron de 10 y 11 ppm. La producción diaria de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) varía según el tipo de sustrato y no se tienen valores fijos. Los valores de producción de (H<sub>2</sub>S) en los reactores 2, 3, 5 y 6 fueron de 6, 8, 12 y 14 ppm. Los valores de producción de metano se mantienen entre (39 y 42 %LEL) límite inferior de explosividad. El volumen de desplazamiento de gas se mantuvo constante en todos los reactores en 25ml.

**Figura 14.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas bovino (05- julio-2022)



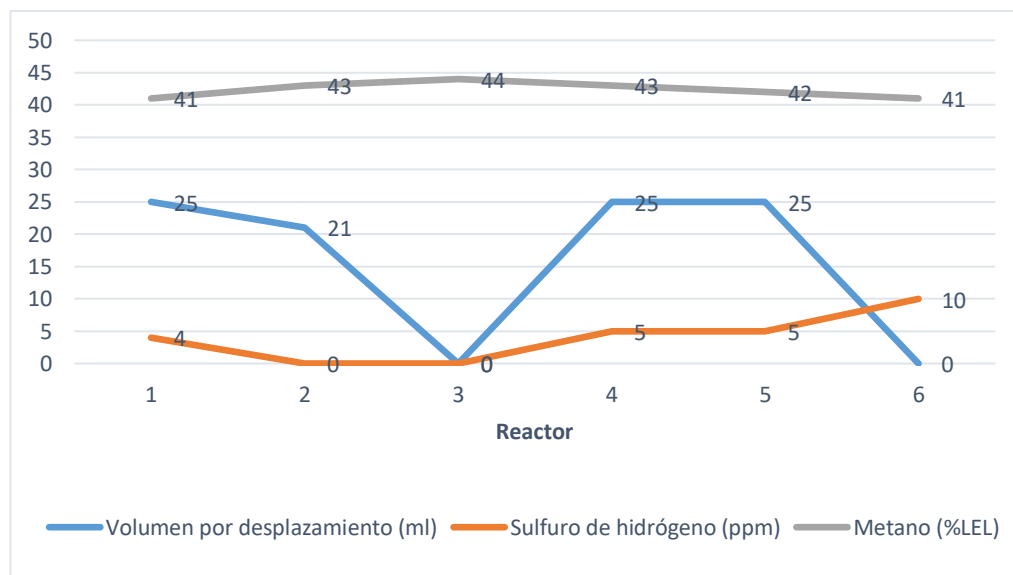
El segundo día se observan que los niveles iniciales del blanco (reactor 1 y 4) fueron de 10 y 12 ppm. Los niveles del reactor 2 siguen disminuyendo significativamente a comparación con los demás reactores, Los niveles de metano se mantienen entre (40 y 42 %LEL).

**Figura 15.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas bovino (06- julio-2022)



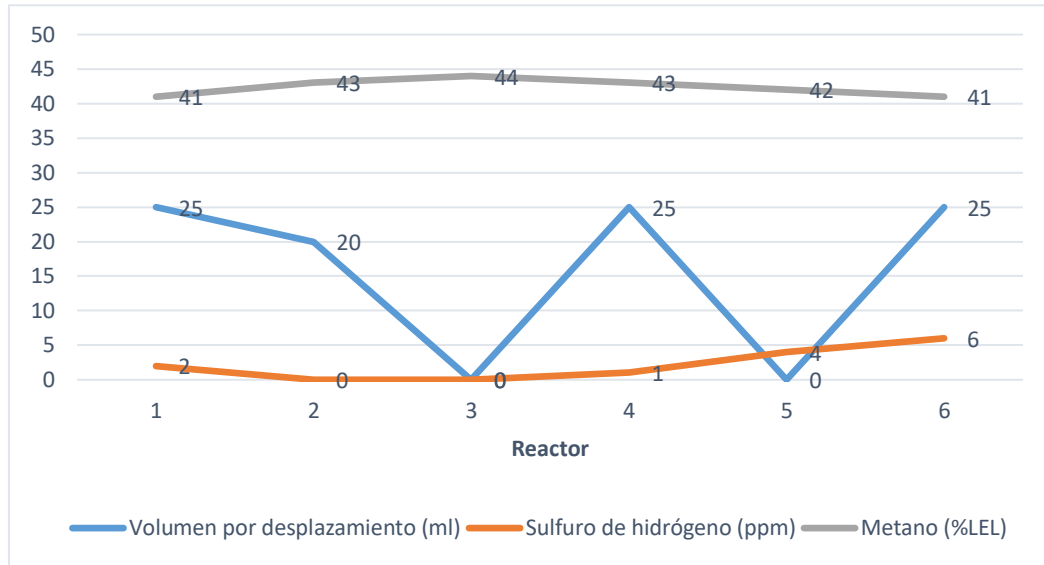
Siguiendo con las mediciones, en la Figura 15 se observa la reducción total de los niveles de sulfuro de hidrógeno en los Reactores 2 y 3, teniendo en cuenta que la concentración de aditivo nano estructurado de hierro fue de 5 ml para el Reactor 2 y 10 ml de aditivo para el Reactor 3, los blancos de referencia (Reactor 1 y 4) siguen produciendo (H<sub>2</sub>S) con valores de (6 ppm) y los Reactores que tienen menor concentración de nano partículas (Reactor 2 y 3), mantienen valores de (H<sub>2</sub>S) similares a los del blanco de referencia con niveles de producción de 3 ppm y 5 ppm. Los niveles de metano se mantienen entre (41 y 42 %LEL).

**Figura 16.** *Valores de la producción de biogás a partir de excretas bovino (07- julio-2022)*



En este día se permite observar el volumen por desplazamiento que ha tenido cada Reactor y consigo los niveles de sulfuro de hidrógeno, los reactores 1 y 4 que son los blancos de referencia se mantienen en 4 y 5 ppm, los reactores 2 y 3, la producción de (H<sub>2</sub>S) es de 0 ppm y el valor de los blancos de referencia disminuye notablemente al pasar de 4 ppm el día 07 de julio a estar en 2 ppm el 08 de julio. La producción de (H<sub>2</sub>S) de los Reactores 5 y 6 esta con niveles de 5 ppm y 10 ppm. Los niveles de metano se mantienen entre (41 y 44 %LEL).

**Figura 17.** Valores de la producción de biogás a partir de excretas bovino (09- julio-2022)



En el día 09 de julio, los niveles de producción de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) para los Reactores 1, 2, 3, 4 y 5 son de 2, 0, 0, 1 y 4 ppm a comparación con el reactor 6 mantiene niveles de concentración de (H<sub>2</sub>S) de 6 ppm. El volumen de desplazamiento se conserva en los reactores 3 y 5 y los niveles de metano se mantienen entre (41 y 44 %LEL).

## 7. Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la caracterización de las excretas, se logró determinar que por sus características fisicoquímicas los residuos avícolas (Codorniz) presentan la mayor producción de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), de los tres sustratos analizados (Bovinos, porcinos y avícolas), ya que las mediciones iniciales arrojaron valores superiores a 18 ppm y por 9 días consecutivos se obtuvo producción de ( $H_2S$ ) al menos en alguno de los 6 reactores.

Es de gran importancia considerar la posibilidad de alimentar cada reactor con sustrato, con el propósito de identificar si se mantendría constante la producción de sulfuro de hidrógeno, con el fin de ampliar la toma de datos y poder realizar un análisis más acorde con los resultados obtenidos durante un lapso de tiempo mayor, considerando mantener constante la proporción de excretas-agua dentro del volumen que permita conservar la relación óptima 1:7.

Los resultados obtenidos frente a la producción de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), se puede concluir que la relación de producción de biogás y el niveles de ( $H_2S$ ) producido por cada reactor, se encuentran estrechamente relacionado, teniendo en cuenta que se tuvieron dos blancos de referencia en cada incubadora y los valores obtenidos fueron los datos con los que se hizo la comparación frente a los otros reactores, con el fin de relacionar y analizar los niveles que cada uno podría estar produciendo frente a la adición de la concentración del aditivo nano estructurado de hierro, entendiendo que la reducción del ( $H_2S$ ) se dio mayormente en el reactor 2 y 3 que fueron los que tuvieron mayor concentración de aditivo con un volumen de 50 ml de aditivo para reactor 2 y 10 ml de aditivo para el reactor 3. El reactor 6 en las mediciones del sustrato porcino y avícola (Codorniz) fue el que mayor tiempo duró produciendo, inicialmente arrojaba valores altos y con

el pasar de los días continuó disminuyendo el nivel de ( $H_2S$ ) hasta no producir nada 0 partes por millón.

Realizando el análisis entre sustratos, se identifica que los residuos avícolas (Codorniz) representa los valores óptimos y más altos de producción de sulfuro de hidrógeno, en el montaje experimental, con un valor máximo de 18 ppm y reducción proporcional de los niveles de ( $H_2S$ ) al siguiente día del montaje, al pasar 9 días se obtuvo reducción total del sulfuro de hidrógeno, demostrando la eficacia que representa el uso de nano partículas de hierro para obtener un biogás con altos niveles de pureza, en comparación con el sustrato porcino, en donde se obtuvieron niveles máximos de 10 ppm y reducción proporcional de los niveles de sulfuro de hidrógeno al siguiente día de 1 ppm y finalizando producción de 0 ppm de ( $H_2S$ ) total al pasar el sexto día. Finalmente los valores del sustrato bovino se lograron niveles de 10 ppm con una reducción significativa al pasar de los días, con un promedio de producción de 4 ppm, determinando que es el tipo de sustrato menos favorable en la producción constante de sulfuro de hidrogeno.

Los niveles de producción de metano se encuentran entre (35 y 44 %LEL) límite inferior de explosividad, los seis reactores demuestran variabilidad entre (1 o 8 unidades %LEL) y se encuentra dentro del rango normal de producción de metano bajo porque son excretas y por sus características y componentes, el porcentaje de azufre puede ser digerido con mayor facilidad a comparación con cultivos energéticos como el maíz, que arrojan una producción de metano entre el 50-60 %)

Cabe destacar que una de las razones para que al paso de nueve días no se produjera niveles de  $H_2S$ , es la posibilidad de que se haya digerido todo el azufre con la biodigestión, razón por la cual se recomienda continuar con estudios que permitan visualizar el comportamiento de la

producción de sulfuro de hidrógeno a un número mayor de días, con el fin de analizar el comportamiento posterior de producción en cada reactor.

## 8. Referencias Bibliográficas

- Acosta, M & Pasqualino, J (2014). *Potencial de uso de biogás en Colombia*. Vol 14 (2) . PP 27 - 33. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6382641.pdf>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2016). Resolución 240 de 2016. Por la cual se adoptan las normas aplicables al servicio público domiciliario de gas combustible con biogás y biometano. <http://www.gobiernobogota.gov.co/resoluci-no-240-de-2016>
- Alvarado, A.C; Predicala, B.Z & Asis, D.A (2015 ). Mixing nanoparticles with swine manure to reduce hydrogen sulfide and ammonia emissions. 12. 893-904. [https://link.springer-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/article/10.1007/s13762-013-0474-y](https://link.springer.com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/article/10.1007/s13762-013-0474-y)
- Ávila , M; Campos, R & Brenes, L (2018). *Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago. Tecnología en Marcha*. 31(2). 159-170. doi: 10.18845/tm.v31i2.3633
- Chavarro, D., & Vélez, M. I. (2017). *Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Colombia y el aporte de la ciencia, la tecnología y la innovación* . [https://minciencias.gov.co/sites/default/files/ctei\\_y\\_ods\\_-\\_documento\\_de\\_trabajo.pdf](https://minciencias.gov.co/sites/default/files/ctei_y_ods_-_documento_de_trabajo.pdf)
- Ciotola, S. & Martin, J (2011). *Energy analysis of biogas production and electricity generation from small-scale agricultural digesters. ) Ecological Engineering*. 37 (11) 1681-1691. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201500219038>
- Congreso de la República de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014. Integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- Elizondo, A & Herrera, E (2012). *Evaluación de medios filtrantes para la reducción del sulfuro de hidrógeno en el mejoramiento de la calidad del biogás*. [Proyecto de Grado]. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstreams/af395a63-ef63-4b50-b046-2dfd2dcd6bfa/download>
- Escobar, A. B. (2018). *Optimizar la producción de biogás a partir de residuos pecuarios, empleando la glicerina como subproducto de la obtención de biodiesel*. [Tesis pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/29726>

- Briceño, I, Valencia, J & Posso, M (2015). *Potencial de generación d energía de la agroindustria de la palma*. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11575>
- Foster, S & Elzinga, D (2018). *The Role of Fossil Fuels in a Sustainable Energy System*. Crónica ONU. <https://www.un.org/en/chronicle/article/role-fossil-fuels-sustainable-energysystem>
- Franco, C; Dyner, I & Hoyos, S. (2007 ). *Contribución de la energía al desarrollo de comunidades aisladas no interconectadas: un caso de aplicacion de la dinámica de sistemas y los medios de vida sostenibles en el suroccidente colombiano*. . [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/22966>
- Garfí. (2016). *Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review*. Science Direct. 60. 599 -314. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.071>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec). (24 de 05 de 2006). NTC 2505: Instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales y comerciales. [https://www.ugc.edu.co/pages/juridica/documentos/institucionales/NTC\\_2505\\_Instalaciones\\_Suministro\\_De\\_Gas.pdf](https://www.ugc.edu.co/pages/juridica/documentos/institucionales/NTC_2505_Instalaciones_Suministro_De_Gas.pdf)
- Kasinath. (2021). *Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 150. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111509>
- Marco, M. (Julio de 2017). *Ecodiseño de un sistema de remocion de sulfuro de hidrógeno en un biodigestor pecuario*. Chihuahua: Cimav. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/830/1/Marco%20Antonio%20Merino%20Rodarte%20MCTA>
- Martínez, R. I. (2018). *Simulación de la desulfuración de biogas por adsorción en un medio nanoparticulado de alta porosidad*. [Tesis de grado, Centro de investigación en materiales avanzados: Repositorio. , <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1929/1/MCTA18.pdf>
- Merino, M. A. (2017). *Ecodiseño de un sistema de remoción de sulfuro de hidrógeno en un biodigestor pecuario*. Tesis de Grado, Centro de investigación en materiales avanzados]. Repositorio <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/830/1/Marco%20Antonio%20Merino%20Rodarte%20MCTA.pdf>

- MinAmbiente. (Julio de 2021). *Producción de Biogás aprupado por biodigestores de pequeña y mediana escala en Colombia*. <https://ledslac.org/wpcontent/uploads/2021/08/Informe-final-biogas-Colombia-v.06082021-final.pdf>
- Montoya. (2020). *Generación De Emisiones De Ácido Sulfhídrico Y Posibles Alternativas De Control Para Su Reducción*. Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental. Medellín: Universidad de Antioquía. [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/17974/5/MontoyaEstefania\\_2020\\_GeneracionEmisionesAcido.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/17974/5/MontoyaEstefania_2020_GeneracionEmisionesAcido.pdf).
- Núñez, M; García, L & López, C (2020). *Evaluación de la remoción de sulfuro de hidrógeno de biogás empleando arcilla ecuatoriana modificada con sodio, zinc y cobre, adaptada morfológicamente*. Avances en Ingeniería. 17(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.6110>
- Pacto Global Red Colombia (2020). Energías renovables, la esperanza para que llegue la luz a todo el Caquetá. <https://www.pactoglobalcolombia.org/news/energias-renovables-la-esperanza-para-que-llegue-la-luz-a-todo-elcaqueta.html>
- Ministerio de Medio Ambiente (2020). Guía de biogás para el sector porcícola colombiano. *Porkcolombia.co*. <https://www.porkcolombia.co/guia-de-biogas-para-el-sectorporcicola-colombiano/>
- Prabhu, A; Raja, S; Avinash, A & Pugazhendhi, A (2021). *Parametric optimization of biogas potential in anaerobic co-digestion of biomass wastes*. Fuel. 288. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119574>
- Quintero, M; Alzate, M; Patiño, F & Pinzón, Y (2019). *Physicochemical and microbiological monitoring of anaerobic digestion at laboratory and low cost tubular digester*. Bioresource Technology. Vol 274. P 321 - 328. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.091>
- Rincón-Velásquez, N. Y., & Castiblanco-Rozo, C. (2021). Políticas y normas sobre energías renovables para el desarrollo de biogás en Colombia. Una revisión. *Gestión Y Ambiente*, 24(1), 98868. <https://doi.org/10.15446/ga.v24n1.98868>
- Rodríguez, C (2017). *Los biodigestores: fuente de desarrollo sostenible y calidad de vida en comunidades rurales de Colombia*. Bogotá D.C: UDCA. [Trabajo de grado, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A]. Repositorio.

- <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/787#:~:text=Los%20biodigestores%2C%20%20sis%20temas%20de,en%20funci%C3%B3n%20de%20su%20bienestar.>
- Silva, J. (2002). *Tecnología del biogás*.  
[https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/SILVA%202002.%20Tecnolog%C3%ADa%20del%20Biog%C3%A1s.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SILVA%202002.%20Tecnolog%C3%ADa%20del%20Biog%C3%A1s.pdf)
- Toala, E. (2013). *Diseño de un biodigestor de polietileno para la obtención de biogás a partir del estiércol de ganado en el rancho verónica*. [Trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio. <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/3406>
- Convenio ATN/FM-12825-CO. UPME. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Colombia.  
[http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion\\_Energias\\_Renovables/INTEGRACION\\_ENERGIAS\\_RENOVANLES\\_WEB.pdf](http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf)
- Velásquez, M; Rincón, J. (2018). *Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento*. [Informe de investigación, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio. <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1317>
- Ventorino, V; Romano, I; Pagliano, G & Robertiello, A (2018). *Pre-treatment and inoculum affect the microbial community structure and enhance the biogas reactor performance in a pilot-scale biodigestion of municipal solid waste*. *Waste Management*. 73. 69-77.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.005>
- Yaqoob, H; Heng, Y; Ud, Z & Us, N (2021). *The potential of sustainable biogas production from biomass waste for power generation in Pakistan*. *Journal of Cleaner Production*. 307.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127250>

## Anexos

Peso de las excretas Bovinas inicialmente diluidas para alimentar el reactor tipo Bach

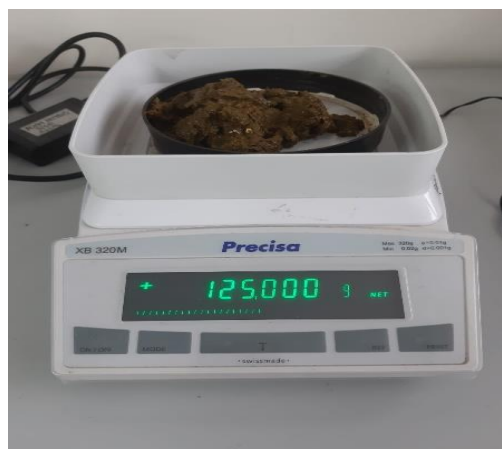


Dilución de las excretas bovinas en dos litros de agua para la alimentación del reactor tipo

Bach



Peso adicional de excretas bovinas para la alimentación continua del reactor tipo Bach



Inóculo activo de una granja porcina, junto a los dos litros de excretas porcinas diluidas.



Excretas porcinas divididas en un litro de agua listas para ser añadidas en el Reactor tipo Bach



Montaje completo de Reactor tipo Bach junto con tres litros de excretas bovino y un litro de inóculo activo



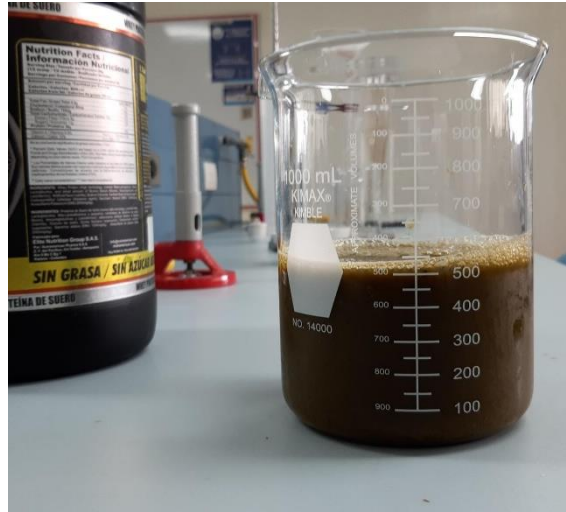
Adición de 500 ml de excretas de bovino al Reactor tipo Bach



Reactor tipo Bach con tres litros y medio con excretas de bovino y un litro de inóculo activo



Adición nuevamente de 500ml de excretas de bovino al Reactor tipo Bach

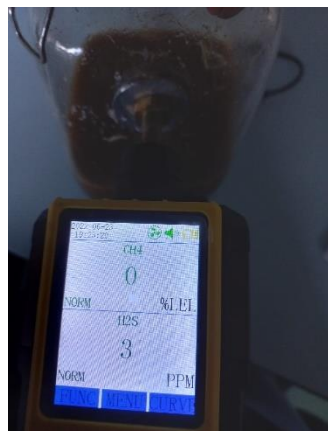


Reactor tipo Bach completo con cuatro litros de excretas porcinas y un litro de inoculo activo

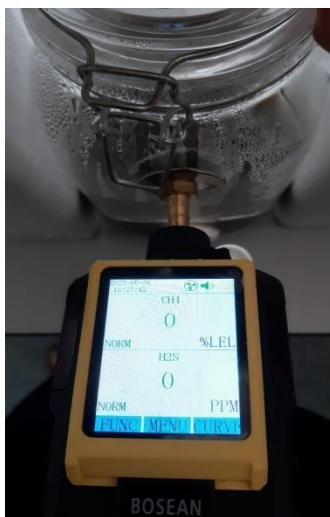


Datos arrojados por el medidor portátil de gas  $H_2S$  y  $CH_4$  (portable Multi-gas K-600) al paso de 4 días

Residuos avícolas (Codorniz)



Excretas de Bovino



Excretas de Porcino



Montaje completo de las dos incubadoras con los 6 mini reactores en su interior



Montaje para la medición del movimiento por desplazamiento en los 6 mini reactores

