

EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DE GASES SUBPRODUCTO (H_2S) DE
SUSTRATOS ORGÁNICOS EN PROCESOS DE BIODIGESTIÓN ANAEROBIA A
ESCALA LABORATORIO



CRISTIAN CAMILO RAMOS DURÁN



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO
2022

EVALUACIÓN DE LA GENERACIÓN DE GASES SUBPRODUCTO (H₂S) DE
SUSTRATOS ORGÁNICOS EN PROCESOS DE BIODIGESTIÓN ANAEROBIA A
ESCALA LABORATORIO

CRISTIAN CAMILO RAMOS DURÁN

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO AMBIENTAL

Asesor

PHD. CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

Doctor en Ingeniería Ambiental

Magíster en Ingeniería Sanitaria

Ingeniero Químico.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2022

Autoridades Académicas

P. Fray José Gabriel Mesa Angulo, O.P

Rector General

P. Fray Eduardo González Gil, O.P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.

Rector Sede Villavicencio

P. Fray Rodrigo GARCÍA JARA

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE

Decano de la Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota del Autor

Cristian Ramos, Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomas sede Villavicencio – Meta.

Esta investigación fue realizada con cooperación de la Pontificia Universidad Javeriana. Cualquier comunicación a este informe debe ser enviado a la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomas sede Villavicencio, Meta.

E-mail: investigacionfiavillavo@usantotomas.edu.co

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	6
2.	Justificación.....	8
3.	Objetivos.....	11
3.1.	Objetivo general.....	11
3.2.	Objetivos específicos.....	11
4.	Marco de referencia.....	12
4.1.	Marco teórico.....	12
4.2.	Marco conceptual.....	14
5.	Metodología.....	19
5.1.	Medición de reactores, sustrato de (porcinos, bovinos, aves y plátano) + Inóculo.....	26
6.	Resultados.....	27
6.1.	Diseño experimental en el laboratorio para evaluar y comparar la producción del ácido sulfhídrico	29
6.2.	Recopilación de datos de medición de H ₂ S y CH ₄	30
7.	Conclusiones	32
8.	Referencias bibliográficas	33
9.	Anexos	38
9.1.	Anexo 1 Metodología	38
9.2.	Anexo 2 Datos Fisicoquímicos Excretas Animales.....	40

1. Introducción

El biogás se compone principalmente por metano (CH₄) que está en concentraciones altas, y es inflamable y dióxido de carbono (CO₂), pero también tiene trazas de otros compuestos como amoníaco (NH₃), nitrógeno (N), hidrógeno (H), vapor de agua (H₂O) y sulfuro de hidrógeno (H₂S). De estos gases el compuesto de interés es el Sulfuro de hidrogeno (H₂S), generado a partir de materiales orgánicos, conlleva a que reaccione de forma corrosiva y principalmente toxica, además la generación de olores desagradables que pueden llegar a crear repulsión o aversión de las personas a este tipo de tecnologías, además causa problemas masivos durante la generación de energía a partir del biogás, Ej. corrosión de motores e intercambiadores de calor, lo que provoca cambios de aceite de motor frecuentes y, por tanto, costosos (Schieder, y otros, 2003).

Tabla 1. Concentraciones típicas de H₂S en diferentes sustratos.

Tipo de sustrato	Tipo de biodigestor	Concentraciones promedio o variaciones de rango	Referencias
Desechos de cocina	Reactor de compostaje	0 - 700 ppm	(Yuan, Longlong, Shuyan, Fan , & Zhiye , 2019)
Estiércol porcino	BATCH	501 a 1000 ppm	(Alvarado, Predicala, & Asis, 2015)
Desechos biológicos, estiércol y desechos de alimentos	BATCH	2000 a 6000 ppm	(Schieder, y otros, 2003)
Aguas residuales	UASB, zona de sedimentación	0 – 50 ppm	(Pagliuso, Passig, & Villela H, 2002)
Aguas residuales	UASB, cámara de disipación aguas abajo.	100 - 500 ppm	(Pagliuso, Passig, & Villela H, 2002)

Según la bibliografía se evidencian los tipos de sustratos y de biodigestores junto con la producción preliminar de H₂S esperada según el tipo de sustratos encontrados.

La ejecución de esta investigación partió de un proyecto macro interinstitucional denominado “Aditivo nanoestructurado para reducir el contenido de H₂S en biogás producido por digestión anaeróbica”, de la facultad de Ingeniería Ambiental en el marco

del Grupo de Investigación Gestión Ambiental USTA Villavicencio – GAUV. Contó con el apoyo de la Pontificia Universidad Javeriana, a través del Grupo de Investigación GNano. El objetivo de la presente Auxiliatura de Investigación fue determinar la influencia del origen de diferentes sustratos en la generación del (H₂S) en el proceso de la digestión anaerobia a nivel experimental a escala laboratorio, usando múltiples microrreactores tipo batch de 0,75 L. Estos microrreactores estuvieron constituidos con 200 ml de inóculo de bacterias anaerobias cultivadas en los laboratorios de la USTA, (preparado en un reactor con agitador en cual se alimentó cada 3 días con excretas de cerdo) y 300mL de una mezcla excretas/agua en proporción 1:7 de los siguientes animales: cerdos, vacas y codornices. Para el sustrato de residuos agrícolas se prepararon 5 g de residuos de cultivo de plátano y 200 mL de inóculo. El diseño experimental permitió la evaluación comparativa en la generación del H₂S del biogás producido en función de los diferentes sustratos utilizados. Los resultados indican las concentraciones de H₂S presentes en los sustratos estudiados, recolectados del Departamento del Meta en condiciones mesofílicas para porcinos, bovinos, codornices y residuos agrícolas de plátano. Entre las razones para el estudio de la concentración de H₂S, se encuentra la posibilidad de eliminarlo para garantizar una operación segura al evitar riesgos de intoxicación en el personal y corrosión de equipos cuando se utiliza este biocombustible, el cual es equivalente al gas natural, pero presenta este residuo perjudicial (H₂S), por esto es de gran importancia la realización del diseño experimental, llevado a cabo en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio.

2. Justificación - pertinencia social y/o ambiental

Es importante el desarrollo e implementación de los usos de métodos fisicoquímicos que comúnmente se utilizan para eliminar el sulfuro de hidrógeno del biogás. El biogás con este compuesto produce una acción corrosiva y principalmente tóxica en el entorno y en humanos, esta exposición provoca irritación en ojos, nariz y boca, además de problemas respiratorios y pérdida de conocimiento, generación de olores desagradables que pueden llegar a crear repulsión o aversión a este tipo de tecnologías. Además, los subproductos químicos de los métodos fisicoquímicos dan como resultado una contaminación secundaria grave, no solo por la acción corrosiva en seres humanos, sino que en bajas concentraciones produce olores desagradables (Gabriel D; Deshusses, Marc A, 2003). Las bacterias quimiotróficas oxidantes del azufre son candidatas adecuadas para la eliminación biológica de H₂S porque oxidan el sulfuro a azufre, sulfato o tiosulfato elemental utilizando nitrito, nitrato u oxígeno como aceptores de electrones (Cai, y otros, 2013).

Debido a la importancia de la disminución en la generación de H₂S, fue de gran importancia llevar a cabo la ejecución de esta investigación, la cual, es el punto inicial, que parte de un proyecto macro de la facultad de Ingeniería Ambiental dentro del Grupo de Investigación Gestión Ambiental USTA Villavicencio – GAUV, que busca reducir la generación de H₂S en el biogás de los biodigestores rurales de la región de la Orinoquia. Es por esto que es necesario conocer la concentración generada a partir de los sustratos empleados en la región, usualmente residuos agrícolas (Contreras León, Mosquera Beltrán, Rodríguez Rojas, & Rojas Reina, 2018), los cuales debido a las actividades de la región representan un gran potencial en el avance en términos de mayor operatividad. La producción de un biogás de mejor calidad (menos H₂S), permitirá aprovechar de una manera eficiente su valor energético, y la aumentar su capacidad de reemplazar a otros combustibles como el gas natural.

Otra razón para considerar la eliminación del H₂S, es poder aumentar el poder calorífico para así reemplazar a otras fuentes de combustión, y poder utilizar este gas aumentando su eficiencia ideal de metano al máximo, equivalente al gas natural (Roa, 2020).

Hay que tener en cuenta los impactos ambientales potenciales que se generan al producirse el biogás, debido a que se presentan emisiones al aire, que según análisis de ciclos de vida el (H_2S) se presenta no solo como residuo de la digestión anaerobia de un biodigestor, sino que también como una emisión en el motor generador de energía eléctrica, mediante la transformación de biomasa (Mosquera, Rangel , Cabeza, & Acevedo , 2019). En la combustión de H_2S que contiene biogás, se forman óxidos de azufre que perjudican el aprovechamiento del biogás en centrales combinadas de calor y energía, ya que los óxidos de azufre corroen las partes metálicas de la planta y reducen drásticamente la resistencia del aceite de motor en motores de biogás (Schieder, y otros, 2003).

La eliminación biológica de (H_2S) del biogás ha atraído una mayor atención debido a su naturaleza rentable y respetuosa con el medio ambiente (Kuan, Duu, & Xiangliang, 2012). Es por esto que es importante revisar las interacciones bioquímicas y los mecanismos asociados con la respectiva degradación microbiana de los compuestos de azufre-carbono para poder determinar el origen y la constitución de los sustratos y de esta forma conocer la influencia de estos en la generación del ácido sulfhídrico en el proceso de la digestión anaerobia (Cadena & Peters, 1988).

En el proceso de DA (Digestión Anaerobia), existen varias ventajas que permiten que este sea rentable debido a que solo necesita su propia energía, minimizando eficientemente la carga orgánica contaminante, agrega valor debido a la gestión de desechos en el sector agrícola, ganadero y porcicultor, el cual debido al proceso DA de desechos orgánicos, la energía del biogás se puede utilizar para compensar los costos operativos y por lo tanto mejorar la rentabilidad (Tait, Harris, & McCabe, 2021), por lo que se utiliza de forma amplia para el tratamiento de purines, no solo por los costos de procesamiento de desechos que podrían impulsar en gran medida la adopción de procesos de DA, sino que al estar cerrados los biodigestores no se producen malos olores en el exterior de las instalaciones. El biogás generado a partir de materiales orgánicos y del proceso secundario de la DA, crea un beneficio importante, ya que es una fuente de energía renovable compuesta principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Sin embargo, este biogás también contiene contaminantes no

deseados, especialmente el sulfuro de hidrógeno (H₂S), producido por la degradación de proteínas que contienen azufre, (por ejemplo, metionina y cisteína) (Schieder, y otros, 2003).

La generación de H₂S limita el uso de biogás debido a su naturaleza corrosiva en los equipos que puedan entrar en contacto, y esto dificulta el traslado del gas por tuberías, su almacenamiento en tanques y otras estructuras metálicas, como aquellas que participan en la generación y distribución de electricidad (Schieder, y otros, 2003).

La tecnología de biodigestión para la producción de biogás, es relativamente simple pero no ha sido lo suficientemente explotada en Colombia, a pesar de su potencial de residuos agrícolas disponibles, por lo que a largo plazo se espera incrementar su uso en las zonas rurales con este nuevo aporte al conocimiento (Contreras León, Mosquera Beltrán, Rodríguez Rojas, & Rojas Reina, 2018).

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Determinar la influencia de diferentes sustratos en la generación del ácido sulfhídrico (H₂S) en el proceso de digestión anaerobia a nivel experimental a escala laboratorio.

3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y las composiciones de los sustratos de estudio, en función de su implementación en procesos de biodigestión anaerobia.
- Diseñar los experimentos de laboratorio para la evaluación comparativa de la producción de Ácido sulfhídrico (H₂S), considerando potencial de Hidrógeno y Temperatura.
- Analizar la producción de ácido sulfhídrico en función de los sustratos, las características de origen, composición y propiedades fisicoquímicas de los sustratos de estudio.

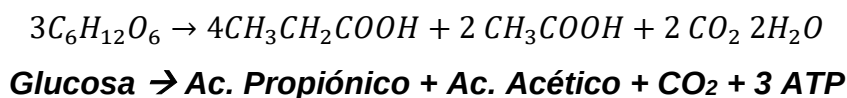
4. Marco de referencia

4.1 Marco Teórico

La digestión anaerobia en un proceso que resulta rentable para la remoción de carbono que se han usado para el proceso de depuración y tratamiento de los desechos orgánicos como orina y excrementos de cerdos y otros animales. El proceso anaeróbico mediante el cual se produce el metano implica cuatro pasos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

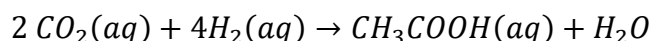
En la hidrólisis se descompone biológicamente los polímeros orgánicos en moléculas más pequeñas (monómeros, dímeros) que atraviesan la membrana celular, este proceso se lleva a cabo gracias a las enzimas llamadas hidrolasas, que solubilizan el material orgánico y debido al agua se rompen los enlaces específicos de este.

La acidogénesis en sus fases comprende la formación de Ac. Acético, butírico y ATP, durante el crecimiento de las células, posteriormente en la siguiente fase, el crecimiento no es exponencial sino estacionario, en esta parte del proceso los ácidos son asimilados.



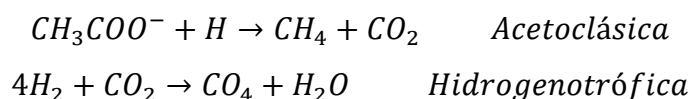
En este proceso fermentativo, bacterias anaerobias estrictas, realizan fermentación de la glucosa y glicerol para producir ac. Propiónico y ac. Acético como subproductos (Corrales, Antolinez Romero, Bohórquez Macías, & Corredor Vargas, 2015).

En la acetogénesis se aceleran los procesos metabólicos bacterianos, los ácidos grasos volátiles se convierten en ácido acético, CO₂ e hidrógeno. El ácido acético es producido por dos mecanismos distintos, por hidrogenación y deshidrogenación.



El resultado de la acetogénesis proporciona a la etapa final de la digestión anaerobia (metanogénesis). El metano se da a partir de dos rutas principales, la acetoclásica y la

hidrogenotrófica, en esta última los microorganismos crecen en sustratos con hidrógeno y dióxido de carbono.



El producto final es metano CH₄ y el aporte de metano por hidrogenotrófica es del 27 al 30% y por la acetoclásica es de 70% (Corrales, Antolinez Romero, Bohórquez Macías, & Corredor Vargas, 2015).

Varias poblaciones de bacterias y arqueas participan en este proceso, y es necesario lograr un delicado equilibrio entre estos dos grupos a medida que realizan actividades bioquímicas (Aydin, 2017). La aparición del sulfuro de hidrógeno se da gracias a las bacterias oxidantes del acetato, estas se especializan en la oxidación de ácidos grasos particularmente el acetato y reducen el sulfato a sulfuro, este paso se conoce como sulfato reducción donde el sulfato pasa a sulfuro de hidrógeno al llevarse a cabo una serie de etapas. Para la eliminación simultánea de H₂S del biogás y la eliminación de nitrógeno de los purines porcinos y el mecanismo microbiano se iniciaron cuatro reactores para estudiar el efecto del inóculo y el tipo de sulfuro en la eliminación simultánea del (H₂S) del biogás y del proceso para la eliminación del nitrógeno en los excrementos y orina de los cerdos. En este estudio se lleva a cabo la utilización de los inóculos, los cuales se conforman por lodos anaeróbicos junto con agua (Cadena & Peters, 1988).

Dentro del marco de esta investigación se planteó el interrogante de cómo se genera el sulfuro de hidrógeno en el proceso de digestión anaerobia, este se encuentra el biogás, el (H₂S) se origina durante la descomposición anaeróbica de aminoácidos presentes en la biomasa, el cual se oxida en presencia de agua para formar ácido sulfhídrico y durante su combustión se genera dióxido de azufre, el cual corroe estructuras metálicas (Schieder, y otros, 2003). Durante la digestión anaerobia de las aguas residuales, el sulfuro de hidrógeno se produce a partir de la degradación de proteínas y otros

compuestos que contienen azufres presentes en las aguas residuales, lo que resulta en la acumulación de sulfuro de hidrógeno en el biogás.

El (H₂S), un producto del proceso de hidrodesulfuración, también está disponible en las reservas de combustible, la materia orgánica que contiene azufre, alcantarillas municipales, plantas para el tratamiento de desagües, operaciones de manejo de cerdos y abonos y operaciones relacionadas con pulpa de madera y papel, la biomasa y las aguas naturales, gases de volcanes, manantiales de azufre, emanaciones de grietas submarinas, pantanos y cuerpos de aguas estancadas y en el petróleo crudo y gas natural, puede representar una amenaza para los humanos y el medio ambiente debido a que en bajas concentraciones se puede acumular en pequeños rincones y pasar desapercibido, y en altas concentraciones resulta tóxico además desprende un olor a materia orgánica en descomposición y huevos podridos. También hay algunas fuentes naturales de (H₂S) disponibles en sedimentos marinos (Ozturk, 2020), fuentes geotérmicas, vetas de carbón y sectores de desechos agrícolas (Arogo, Zhang, Riskowski, & Day, 2000), y se derivan particularmente de la actividad bacteriana, incluidas las reacciones redox de bioquímica.

4.2 Marco Conceptual

El proceso anaerobio es un proceso natural y biológico, realizado por la acción coordinada y combinada de diferentes grupos bacterianos, que degradan la materia orgánica para sus procesos metabólicos, que puede provenir de diferentes fuentes. En ausencia de oxígeno convierten esta materia orgánica en compuestos más sencillos y biogás, que es un combustible renovable, compuesto principalmente por metano, dióxido de carbono y en menor proporción ácido sulfhídrico junto con otros subproductos (Gropelli, E.; O. Giampaoli, 2001). En el caso de la materia orgánica, podemos referirnos a esta como sustrato, que es el factor de más importancia en el proceso anaerobio, debido a que si las condiciones son óptimas este determinará la cantidad de biogás producido y el porcentaje de metano en este, que se da gracias a bacterias metalogénicas también llamadas bacterias anaerobias, estas cuentan con un

metabolismo que genera su energía a partir de sustancias que carecen de oxígeno, son capaces de sobrevivir y multiplicarse en estos ambientes, este proceso normalmente se lleva a cabo a través de procesos de fermentación. No viven ni proliferan en presencia de oxígeno.

Caracterización de sustrato: (Gropelli, E.; O. Giampaolli, 2001) sugiere que toda materia orgánica puede ser utilizada como sustrato para alimentar los biodigestores, y para caracterizar estos sustratos se deben considerar los siguientes parámetros:

- Contenido de sólidos totales (ST): cantidad de solidos secos totales en relación con el peso de la muestra fresca, desecada a 105°C, hasta el peso cte. Este parámetro nos permite inferir la cantidad de materia sólida disponible para ser transformada en biogás, pero que no es toda de composición orgánica, eso lo proporciona el próximo parámetro.
- Contenido de sólidos volátiles: es la materia orgánica volatilizada con respecto a su peso de solido seco, calcinado a 550-600°C hasta peso constante (Gropelli, E.; O. Giampaolli, 2001). Esto comprende la proporción de los sólidos totales, que están formados por compuestos orgánicos, y que son los que finalmente se pueden convertir en biogás.

(Gropelli, E.; O. Giampaolli, 2001) también menciona que se debe considerar la presencia de detergentes, antibióticos, antisépticos o alto porcentaje de lignina en la constitución de los sustratos a emplear, debido a que estos deterioran el proceso de biodigestión.

El *biogás* es el producto final de la digestión anaerobia, se da en medios naturales o en dispositivos específicos, por la degradación de la materia orgánica, por la presencia de microorganismos y otros factores anaerobios. Consiste en una mezcla gaseosa formada en su mayoría por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) y otros gases en menor proporción como el ácido sulfhídrico (H₂S) (Martí, N., 2006).

El *sustrato o purines* son producto de la mezcla de origen orgánico, como estiércol, aguas residuales y restos de vegetales, cosechas, semillas, concentraciones de animales muertos, pesca, comida, excrementos sólidos o líquidos, o mezcla de ellos, con capacidad de fermentar o fermentados que tienen impacto medioambiental, ricos en

nitrógeno y microelementos que cumplen la función de abono foliar. Generalmente se emplea como sustrato líquido principal en biodigestión de residuos agrícolas. Mezcla líquida de un 20 a 25 % de estiércol y un 80 y 85% de orinas (Salcedo Galarza, 2008).

Co-Sustrato: hace parte de los residuos de origen orgánico ricos en carbohidratos, lípidos y un alto contenido de biomasa orgánica disponible para el proceso de digestión anaerobia que junto con los sustratos de origen animal como excretas porcinas aseguran un mayor porcentaje en la producción de biogás y en su calidad, es decir, mayor porcentaje de metano. Los desechos o sustratos agrícolas son posibles cosustratos.

4.3 Marco Legal:

En donde más se ha avanzado en materia de prevención de riesgos en la operación de biodigestores y sistemas de digestión anaerobia es en Europa, más específicamente en Alemania, que es el país que más ha hecho aportes en la generación de recomendaciones y estándares para la operación segura de los sistemas de plantas y biodigestores productores de biogás. México y Chile son los referentes más conocidos en materia de seguridad en la operación de este tipo de plantas, mientras que en Colombia se construyen marcos y lineamientos propios, y más adaptados al contexto de la nación.

Tabla 2. Marco legal

Nº	Norma	Fecha	Autoridad	Descripción	Objetivo
1	Ley 1715	2014	ANLA	Se establecen los beneficios o incentivos por la ley (Roa, 2020). tributarios a los cuales se puede acceder por la instalación de las mismas, haciendo la salvedad que aplicarán únicamente si se cumple con la totalidad de requisitos establecidos	Promover el desarrollo y la utilización de las Fuentes No Convencionales de Energía

Tabla 2. Continuación

2	Document o CREG- 056	22/05/2 009	CREG	Describe, analiza y desarrolla una propuesta sobre la regulación aplicable al biogás, además de identificar el sulfuro de hidrogeno como subproducto presente en el biogás con elementos que pueden ser potencialmente perjudiciales para la salud de las plantas, animales y los equipos de los usuarios.	Desarrollar proyectos solicitados por concepto a la Comisión en relación con la regulación aplicable al biogás.
3	Resolución N°1541	12/11/2 013	MINAM BIENTE	“Se establecen los niveles permisibles de calidad del aire o de inmisión, el procedimiento para la evaluación de actividades que generan olores ofensivos y se dictan otras disposiciones”	Capítulo 2. las quejas por olores ofensivos en donde se aplica un procedimiento para la recepción de quejas por olores ofensivos. También se evalúa la presencia del H ₂ S en donde se tiene en cuenta para procedimientos en la determinación de la concentración de olores ofensivos de este en actividades como el tratamiento de aguas residuales, captación de agua en cuerpos receptores de vertimientos, tratamiento térmico de subproductos de animales y unidad de producción pecuaria (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013).

Tabla 2. Continuación.

4	Resolución 0631, 2015 reglamentada el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984.	2015	MINAMBIENTE	Regula los vertimientos y reúso de aguas residuales	Permite el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua vertidas por 73 actividades productivas presentes en 8 sectores económicos del país.
5	Ley 373, modificada por la Ley 812 de 2003.	1997	Congreso	Estableció el reúso obligatorio de las aguas de origen superficial, subterráneo o lluvias utilizadas en actividades que generen afluentes líquidos, previo a un análisis técnico, socio-económico y de las normas de calidad ambiental (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2021, 2015).	
6	NTC 2505	2006	INCONTEC	Se enfatiza acerca de los materiales y equipos en el numeral cuatro, como tuberías metálicas para la conducción del gas, el cual, en las tuberías de cobre no se deben emplear si el contenido de sulfuro de hidrógeno por cada metro cúbico estándar del combustible gaseoso es superior en promedio a 7 mg/ft ³ estándar de combustible gaseoso (INCONTEC, 2006).	Instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales comerciales.

Nota. Estos lineamientos van dirigidos a los incentivos para la implementación de energías renovables, estos representan una oportunidad al momento de invertir en proyectos basados en Fuentes No Convencionales de Energía, razón por la cual, es importante conocer la Ley 1715 de 2014 en la Tabla 2. Adaptado de (Roa, 2020) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2013) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2021, 2015) (INCONTEC, 2006).

5. Metodología

El montaje experimental se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, donde por medio de pruebas prácticas se investigó la cantidad de H₂S del biogás y su concentración en el proceso de biodigestión con diferentes sustratos (porcino, bovino, aviar y de desechos agrícolas). Las muestras tomadas se analizaron para evaluar la presencia de este subproducto (H₂S) y su relación con la influencia, origen y constitución del sustrato. Previo a la caracterización se revisó bibliográficamente los sustratos a seleccionar, su selección se consideró de acuerdo al proyecto Macro, específicamente los de origen bovino, porcino, aviar y de desechos agrícolas.

Con los datos reunidos en este estudio, se brindó información relevante, debido a que este estudio hace parte de un proyecto macro que busca la reducción de H₂S en diferentes sustratos, los cuales, primero hay que conocer la producción de este para estar al tanto de cuánto se debe disminuir.

Los sustratos fueron recolectados en las instalaciones de la Unillanos sede Barcelona, allí, en 3 recipientes se almacenaron los 3 sustratos.

Figura 1. Sustrato de bovinos, porcinos y aves.



Nota. Los excrementos de los bovinos se recolectaron en los establos, los de aves en la segunda imagen en la granja de codornices y el sustrato porcino directamente de los establos para cerdos, todos en la Unillanos sede Barcelona y se almacenaron en recipiente plástico.

A cada sustrato se les hicieron las caracterizaciones fisicoquímicas

- Caracterización fisicoquímica de los sustratos utilizados:

Se establecieron las condiciones para la recolección de muestras de los sustratos orgánicos los cuales se caracterizaron fisicoquímicamente. Para la caracterización se tomaron diferentes muestras representativas y se determinaron sus valores promedio, con su desviación estándar.

Tabla 3. Parámetros analizados de los sustratos, específicamente los de origen porcino, bovino y de desechos agrícolas.

Parámetros	SUSTRATO		
	Método	Equipo	Frecuencia de medición
Sólidos Totales	Gravimetría	Horno de secado	4 veces por sustrato
Sólidos volátiles totales	Gravimetría	Mufla	4 veces por sustrato
pH	Potenciometría	pH metro	4 veces por sustrato
Densidad	Gravimetría	Pictometro	4 veces por sustrato
Conductividad	Potenciometría	Multiparámetro	4 veces por sustrato
DQO	Oxidación Química	Termoreactor y Espectrofotómetro	4 veces por sustrato

La determinación de estas variables realiza por 4 repeticiones solo al inicio de la prueba sin abrir el reactor debido a que es sustrato comienza a degradarse.

Se utilizaron 8 reactores con un volumen de 750mL mediante un montaje experimental. Para la determinación de biogás y metano a escala laboratorio, la construcción del reactor fue como la descrita por (Contreras León, Mosquera Beltrán, Rodríguez Rojas, & Rojas Reina, 2018), con la diferencia de que los reactores herméticamente sellados iban conectados por pequeño ducto a un globo de látex que impediría el escape del gas producido y su almacenamiento debido a que el gas importante de detectar era el H₂S. Antes de la recolección de los sustratos, se hizo la preparación del inóculo en un digestor con agitación de 7 litros, el cual, 2 semanas antes de montar los 8 reactores, fue alimentado y agitado constantemente para así garantizar una fuente de microorganismos y bacterias adaptadas a las condiciones de la región.

Tabla 4. Preparación del inóculo previo al montaje de los reactores.

Inóculo en reactor con agitación.	Reactores de 750mL
<i>Excretas de cerdo + Agua.</i>	1 8 reactores con sustrato de porcinos.
<i>Proporción 1:7</i>	2 8 reactores con sustrato de bovinos.
<i>2.5L</i>	3 8 reactores con sustrato de aves
	4 8 reactores con sustrato de plátano.

Nota. El inóculo se preparó 3 semanas antes de montar los reactores en el laboratorio, este reactor con agitación tiene una capacidad de 8L, pero solo se dispuso de 5L el cual debía tener líquido, 2.5L correspondían a una masa activa que ya contenía el reactor, el resto se rellenó con solución de excretas de cerdo nuevas, preparadas en proporción 1:7, una parte de excretas y 7 partes de agua. 312.5 gramos de excretas y 2.18L de agua.

Una semana después de agregar los 2.5 L de solución de excretas, periódicamente se fue extrayendo 500mL de líquido, el cual se desechaba y se reemplazaba en igual cantidad una solución de excretas nuevas en proporción 1:7, 62.5 gramos de excretas y 437.8mL de agua. Así, cada tres días por una semana.

Figura 2. Montaje del inóculo en el reactor agitador.

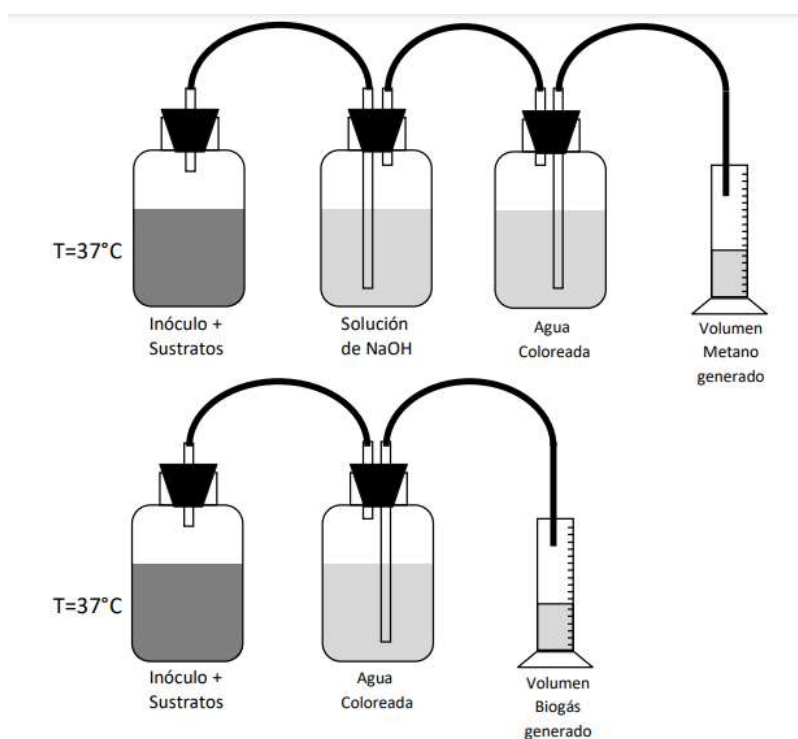
Nota. Las

imágenes representan el montaje biorreactor productor de inóculo, este permanecía a temperatura ambiente y fue constantemente alimentado durante la producción del biogás en los sustratos estudiados

El tipo de inóculo y sustratos de cada reactor se muestran en la Tabla 4, en el cual se tuvo en cuenta la capacidad total del reactor 750mL, por lo que se hizo una mezcla de 200mL del inóculo preparado, junto con 300mL de sustrato (este sustrato previamente se mezcló con agua en una proporción de 1:7), 42.85 gramos de excretas y 257.15mL de agua.

Figura 3. Sellado de los reactores.

Nota. Los reactores debían ser correctamente sellados, para garantizar que fueran anaerobios y evitando el escape de metano y subproductos

Figura 4. Montaje experimental para la determinación de biogás y metano

Nota. Escala de laboratorio en reactores tipo batch (Rojas et al., 2018).

Los experimentos del laboratorio permitieron determinar la concentración de ácido sulfhídrico a través de la determinación del biogás producido a partir de los sustratos y su comportamiento durante el proceso anaerobio. El diseño experimental: el reactor

consiste en un contenedor de 0.75L que hizo de biodigestor, el cual estuvo correctamente sellado y cubierto con silicona por los bordes para evitar el contacto con el exterior, el gas producido fluía por un pequeño ducto a un contenedor de látex, para obtener una medición del gas producido a temperatura mesofílica y evitar filtraciones. Este gas de salida se analizó en su composición de CH_4 y H_2S diariamente (por 7 días). El reactor se mantuvo a temperatura de crecimiento mesofílica ($37^{\circ}C$) en la incubadora, la digestión se dio por concluida cuando el volumen diario producido era menor al 1% de la mayor cantidad producida desde el inicio. Estos valores de temperatura y presión serán normalizados a $0^{\circ}C$ y 1 atmósfera. Debido a la variabilidad en la composición de los sustratos, las pruebas se realizarán en varias corridas para obtener valores promedios de la producción de biogás y así tener valores confiables de concentración de (H_2S) en la siguiente fase.

El montaje de los sustratos de hicieron de la misma forma en los sustratos de bovino, porcinos y aviar. Para un volumen de 750mL se introdujo 200mL de inóculo previamente preparado y 300mL en una proporción 1:7, 42.85mL de excretas, 257.15mL de agua. En total, para 8 reactores se dispuso de 1600mL de inóculo y 2400mL de sustrato, en la misma cantidad para los 3 sustratos.

Figura 5. Preparación y mezcla del Sustrato/Inóculo.



Nota. En cada sustrato se introdujo el inóculo y después la mezcla de sustrato, posterior a ello se sellaron.

Figura 6. Incubación de los 8 reactores.

Los 8 reactores se dispusieron después de sellados en una incubadora a temperatura mesofílica durante 5 días, para que en el día 6 iniciaran las mediciones de metano y ácido sulfhídrico.

En cada preparación de la mezcla de sustrato/inóculo, se midió el pH y conductividad del contenido de los reactores antes de sellados y después de las mediciones de ácido sulfhídrico y metano, la medición se realiza con una sonda multiparámetro como se aprecia en la Figura VII.

Figura 7. Medición de pH y conductividad.

Nota. Medición de valores de pH y conductividad, estos valores se medían por reactor, al ser 8 valores por sustrato, se calcula el valor promedio como se aprecia en la Tabla 8.

- Análisis de la producción del H_2S en función de los sustratos estudiados: Como última fase se busca probar la concentración del (H_2S) y su presencia en cada uno de los sustratos para identificar estas concentraciones y cuales presentan una mayor generación de este subproducto.

Posterior a la medición de parámetros y variables como potencial hidrogeno, conductividad, DQO, sólidos volátiles y totales se sellaron los 8 reactores por sustrato y se almacenaron en la incubadora como se aprecia en la Figuran VI, por cerca de 5 y 6 días a temperatura mesofílica, para garantizar las condiciones de crecimiento de microorganismos anaerobios dentro del reactor.

Figura 8. Incubación de reactores.



Nota. Reactores con mezcla de sustrato e inoculo, pasados los 6 días en la incubadora a temperatura mesofílica.

En este punto de la ejecución del proyecto se comenzaron a medir las concentraciones de ácido sulfhídrico (ppm) y metano (%), las mediciones se pudieron llevar a cabo gracias a un dispositivo, préstamo de la Universidad Javeriana, este consistía en un detector portátil de H_2S y CH_4 (Portable Multi-gas Detector with Built-in Pump), el dispositivo se autocalibra con el aire y la validación de los datos se obtuvo a través de las repeticiones en la medición experimental que permitió obtener estos valores fundamentales en la investigación.

Figura 9 Detector portátil de gases.Medidor, detector portátil de gas H₂S y CH₄ (Portable Multi-gas Detector with Built-in Pump).

5.1 Medición de reactores, sustrato de (porcinos, bovinos, aves y plátano) + Inóculo.

Pasados cerca de 6 días desde que se incubaron los reactores, se inició con la medición de gas metano y ácido sulfhídrico en cada uno de los 8 reactores, en total se midieron por 7 días cada uno de estos por sustrato, la medición consistió en retirar el globo de látex de la válvula de salida del reactor y ajustarla acoplando la pequeña manguera en la entrada del dispositivo detector que absorbía el gas para así comenzar con la detección, el dispositivo arrojaba en tiempo real la medición de H₂S y CH₄ en la pantalla principal, se esperaba a que el dato se estabilizara para guardarlo y se procedía con el siguiente reactor sucesivamente hasta llegar a 32 mediciones de ácido sulfhídrico (ppm) y porcentaje de metano producido en cada reactor, a estos datos se le obtuvo su valor promedio para obtener un dato más confiable de concentración de H₂S, dato obtenido para posterior análisis.

6. Resultados

La determinación de sólidos (Totales, fijos y volátiles) se llevaron a cabo en 4 repeticiones, donde se tomaron 4 capsulas por sustrato, de allí se sacó un promedio después.

Muestra de cálculo de sólidos totales y fijos, para sólidos volátiles.

$$St = \frac{\text{Cápsula } 105^{\circ} - \text{Cápsula Vacía}}{\text{Volumen de la muestra}}$$

$$Sf = \frac{\text{Cápsula } 550^{\circ} - \text{Cápsula Vacía}}{\text{Volumen de la muestra}}$$

$$Sv = \sum St - Sf$$

St: Sólidos Totales; Sf: Sólidos Fijos; Sv: Sólidos Totales.

El volumen de la muestra para porcinos bovinos y codornices (aviar) fue de 3 gramos y para el sustrato de pseudo tallo de plátano, fue de 15 gramos.

Tabla 5. Determinación de sólidos totales, sólidos fijos y sólidos volátiles, en gramos.

Corridas	Sustrato	Cápsula Vacía gr	Cápsula 105° gr	% Sólidos Totales	Peso Crisol vacío gr	Crisol+3gr	Peso Crisol Incinerado	Sólidos Fijos	% Sólidos volátiles
1	Bovino	75,27	81,53	12,52%	25,73	28,73	26,30	0,19	9,22%
2	Bovino	77,54	83,85	12,62%	25,86	28,86	26,39	0,18	9,34%
3	Bovino	84,27	90,66	12,78%	24,27	27,27	24,81	0,18	9,94%
4	Bovino	89,79	96,21	12,84%	24,39	27,39	24,94	0,19	9,80%
5	Porcino	88,32	111,57	46,51%	21,85	24,85	23,53	0,56	5,61%
6	Porcino	88,47	111,66	46,38%	20,18	23,18	21,86	0,56	6,06%
7	Porcino	92,98	115,71	45,46%	18,29	21,29	19,85	0,52	7,26%
8	Porcino	92,05	114,27	44,43%	21,22	24,22	22,83	0,54	6,07%

Tabla 5. Continuación.

9	Aviar	97,40	109,35	23,89%	17,36	20,36	18,16	0,27	12,09%
10	<i>Aviar</i>	95,33	107,07	23,48%	16,99	19,99	17,76	0,26	12,55%
11	<i>Aviar</i>	102,73	114,35	23,25%	17,20	20,20	18,07	0,29	11,81%
12	<i>Aviar</i>	92,04	103,69	23,32%	16,99	19,99	17,78	0,26	12,45%

Tabla 6. Determinación de sólidos totales, sólidos fijos y sólidos volátiles, (Plátano)

Porcelanas	Sustrato	Cápsula Vacía gr	Cápsula 105° gr	% Sólidos Totales	Peso Crisol Incinerado	Sólidos Fijos	% Sólidos Volátiles
13	<i>Plátano</i>	26,283	27,892	10,73%	26,361	0,0052	10,207%
14	<i>Plátano</i>	22,464	23,733	8,46%	22,535	0,0047	7,987%
15	<i>Plátano</i>	23,620	24,889	8,46%	23,692	0,0048	7,980%
16	<i>Plátano</i>	21,690	23,334	10,96%	21,770	0,0053	10,427%

Nota. Esta determinación de sólidos volátiles fijos y totales se realiza en 4 corridas, para tener unos datos más confiables, a estos datos, posteriormente se obtendrá su valor real al sacar la media correspondiente.

Los valores promedio de los sólidos volátiles de cada sustrato se presentan a continuación.

Bovino	9,57%
Porcino	6,25%
Aviar	12,22%
Plátano	9,15%

Para determinar el porcentaje de sólidos volátiles, totales y fijos, en desechos agrícolas se utilizó el pseudotallo del plátano como desecho de la industria agrícola, este tiene un bajo contenido de sólidos volátiles, la información bibliográfica revela que este residuo orgánico presenta valores de sólidos volátiles bajos (Durán Hernández, 2020), por lo que se le considera un sustrato de fácil degradación, en contraste, el pseudotallo tiene un alto porcentaje de lignina y cenizas, sin embargo, es un valor bajo comparado con otras biomásas lignocelulósicas como residuos de trigo, cascarilla del arroz o residuos de maíz (Rao, Seetharama, Ratnavathi, Umakanth, & Dalal, 2010). Por esta razón se puede

considerar el valor promedio de sólidos volátiles del residuo de plátano en 9,15%, debido a que en comparación con la investigación de Durán, es normal y se debería asegurar una concentración de sólidos volátiles inferior al 10% con el propósito de garantizar buen contacto biomasa-inóculo, este valor representa la materia orgánica disponible para la producción de biogás, en este sustrato específico la humedad es alta, por lo que solo se hizo la mezcla del sustrato + inóculo sin agua.

El contenido de sólidos volátiles se interpreta en términos de materia orgánica, teniendo en cuenta que la materia orgánica, al exponerla a temperaturas de 550°C, se oxida formando gas carbónico y agua, estos se volatilizan. Estos estiman la cantidad de materia orgánica que queda en un lodo biosólido o sustrato orgánico, en este caso el porcentaje de sólidos volátiles, que en la medición de los sustratos el que más porcentaje tuvo, fue el del aviar, que obtuvo un porcentaje de sólidos volátiles del 12,22%, lo que quiere decir que este sustrato y la materia orgánica en este, tiene gran potencial para el crecimiento de microorganismos que promuevan la producción de biogás y de H₂S. La producción de H₂S en sustrato Aviar fue de 20.06ppm, es el sustrato que más partes por millón reportó el medidor.

6.1. Diseño experimental en el laboratorio para evaluar y comparar la producción del ácido sulfhídrico.

La función de los experimentos en el laboratorio será determinar parámetros fisicoquímicos y la concentración del subproducto del biogás en procesos de biodigestión anaeróbica.

Tabla 7. Parámetros para determinar durante las corridas experimentales

Parámetros	SUSTRATOS		
	Método	Equipo	Frecuencia de medición
Concentración H₂S (Biogás)	Columna analítica	Analizador de biogás	Diaria
Concentración CO₂ (Biogás)	Columna analítica	Analizador de biogás	Diaria
Concentración CH₄ (Biogás)	Columna analítica	Analizador de biogás	diaria
pH (líquido)	Potenciometría	pH metro	Al inicio y final
Conductividad (líquido)	Conductimetría	Multiparámetro	Al inicio y final

Determinación de las corridas experimentales, método, equipo y frecuencia de medición de la concentración de cada componente de biogás, pH y conductividad. Nota. La evaluación microbiana diaria de pH la harán después quienes continúen el proyecto, al agregar las nanopartículas en el mencionado proyecto marco.

Tabla 8. Valores promedio de potencial hidrogeno y conductividad en los 4 sustratos al inicio y al final.

INICIO			FINAL		
Digestores	pH	Conductividad mS/cm	Digestores	pH	Conductividad mS/cm
Porcino	8,69	4,04	Porcino	7,11	2,38
Bovino	7,26	2,32	Bovino	7,31	2,11
Aviar	7,11	4,69	Aviar	7,35	10,86
Plátano	7,15	3,54	Plátano	7,30	3,49

Nota. Los datos, resultados de la medición de los sustratos, se hicieron al inicio y al final, midiendo con la sonda multiparámetro cada uno de los 8 reactores por sustrato, para obtener un resultado más confiable, a los cuales se obtuvo su valor promedio.

6.2. Recopilación de datos de medición de H₂S y CH₄.

La medición se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio campus Aguas Claras. Se ejecutaron en 3 meses, las mediciones y registro de los datos arrojados por el detector, este permitió la recopilación de datos expuestas a continuación.

Tabla 9. Recopilación, sumatoria y promedios de los datos arrojados por la medición de H₂S y de porcentaje de CH₄ en los cuatro sustratos de origen animal y agrícola de la región.

PORCINO			BOVINO		
<i>Reactor</i>	<i>% de CH₄</i>	<i>PPM</i>	<i>Reactor</i>	<i>% de CH₄</i>	<i>PPM</i>
1	34,10	18,57	1	43,90	4,79
2	37,79	15,46	2	42,27	3,00
3	24,86	6,60	3	45,80	7,60
4	27,64	3,60	4	41,64	2,09
5	31,09	14,70	5	41,34	1,61
6	28,76	6,20	6	43,93	1,90
7	30,82	8,36	7	38,23	1,57
8	29,43	10,80	8	43,29	6,24
Sumatoria	244,47	84,29	Sumatoria	340,40	28,80
Promedio	30,56	10,54	Promedio	42,55	3,60
AVIAR			PLÁTANO		
<i>Reactor</i>	<i>% de CH₄</i>	<i>PPM</i>	<i>Reactor</i>	<i>% de CH₄</i>	<i>PPM</i>
1	43,97	21,29	1	30,56	0,14
2	42,49	28,84	2	22,00	0,79
3	29,33	5,07	3	36,83	0,62
4	40,30	24,53	4	20,94	0,93
5	32,23	29,06	5	29,14	0,00
6	39,63	16,59	6	26,38	0,00
7	37,27	15,56	7	27,62	0,00
8	43,54	19,56	8	28,88	0,29
Sumatoria	308,76	160,49	Sumatoria	222,36	2,76
Promedio	38,59	20,06	Promedio	27,79	0,35

Nota. Los anteriores datos son de gran importancia para el estudio de sustratos usados en la región de la Orinoquía productos de las actividades de la región, por lo que sus resultados serán aplicables a esta región en particular, así como otras de Colombia donde se usen similares sustratos en condiciones climatológicas equiparables. La información obtenida será base para la primera fase del proyecto "Aditivo nanoestructurado para reducir el contenido de H₂S en biogás producido por digestión anaeróbica", en el objetivo "Conseguir que el aditivo responda eficazmente en reducción de H₂S para los sustratos de mayor disponibilidad en zonas no interconectadas (ZNI) y de elevado potencial de producción de biogás, específicamente los de origen bovino, porcino, aviar y de desechos agrícolas".

7. Conclusiones

Los resultados de este proyecto reflejan que las concentraciones de H₂S presentes en los sustratos estudiados, recolectados del Departamento del Meta en condiciones mesofílicas fueron: porcinos (aprox 10.54 ppm), bovinos (aprox 3.60 ppm), codornices (aprox 20.06 ppm) y residuos agrícolas de plátano (aprox 0.35 ppm). Esto permite tener una base de comparación para la utilización de nanopartículas para emplearlas en estos sustratos y observar si disminuye o no la concentración de H₂S.

Aunque la producción de H₂S es menor a la reportada en la bibliografía, esto se debe a la menor escala de los microrreactores. El sustrato que más reportó H₂S fue el de las codornices, según el porcentaje de sólidos volátiles para el sustrato aviar, este fue de 12,22%, lo que indica un mayor contenido de materia orgánica en comparación con los demás sustratos, dato que nos puede indicar su alta producción de metano y ácido sulfhídrico, incluso su valor supera casi por 2 veces al segundo que más ppm de H₂S reportó fue el sustrato de porcinos. El sustrato que menos partes por millón de H₂S reportó, fue el de pseudotallo de plátano, una de las razones de su bajo valor en comparación de los otros, es que este sustrato de origen vegetal, específicamente su contenido de celulosa, agua y lignina es superior, por lo tanto, su contenido orgánico es mucho menor en comparación con los sustratos de bovinos, porcinos y de aves.

Entre las razones para el estudio de la concentración de H₂S, se encuentra la posibilidad eliminarlo para garantizar una operación segura al evitar riesgos de intoxicación en personal y corrosión de equipos, al momento de usar este biocombustible el cual es equivalente al gas natural, pero presenta este residuo perjudicial, es por esto la gran importancia la realización del diseño experimental que se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad Santo Tomas sede Villavicencio.

8. Referencias bibliográficas

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2021. (2015). *Vertimientos y reuso de aguas residuales*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales#:~:text=La%20norma%20de%20vertimientos%2C%20la,industrial%20y%20ambiental%20del%20pa%C3%ADs>.
- Alvarado, A. C., Predicala, B. Z., & Asis, D. A. (2015). Mixing nanoparticles with swine manure to reduce hydrogen sulfide and ammonia emissions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12, 893–904. doi:<https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1007/s13762-013-0474-y>
- Arogo, J., Zhang, R. H., Riskowski, G. L., & Day, D. L. (2000). *Producción de sulfuro de hidrógeno a partir de estiércol de cerdo líquido almacenado: un estudio de laboratorio*. Científico, Universidad Estatal de Carolina del Norte, Ingeniería Biológica / Agrícola, North Carolina.
- Aydin, S. (2017). *Anaerobic Digestion*. Springer, Cham. doi:https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1007/978-3-319-49595-8_1
- Cadena, F., & Peters, R. (1988). *Evaluación de oxidante químico para control de sulfuro de hidrógeno* (Vols. Vol. 60, No. 7 (Jul., 1988), pp. 1259-1263 (5 pages)). Journal (Water Pollution Control Federation). Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/25043633>
- Cai, J., Zheng, P., Xie, Z., Sun, P., Li, W., & Zhang, J. (2013). Eliminación anaeróbica simultánea de sulfuros y nitratos junto con la generación de electricidad en una celda de combustible microbiana. *Bioresour Technol*, 224–228.
- Contreras León, H., Mosquera Beltrán, Y. N., Rodríguez Rojas, M. P., & Rojas Reina, C. J. (2018). *Determinación del potencial de biogás de diferentes sustratos para la codigestion*. Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio, Facultad de Ingeniería Ambiental. Villavicencio: Grupo Gestión Ambiental USTA Villavicencio - GAUV. doi:<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/22656/Documento%20de%20Trabajo%20N%C2%B0%20S01.%20Determinacio%cc%81n%20del%20potencial%20de>

%20bioga%cc%81s%20de%20diferentes%20sustratos%20para%20la%20codigestion%20anaerobia%20con%20excretas%20animal

Corrales, L. C., Antolínez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., & Corredor Vargas, A. M. (2015). *Anaerobic bacteria: processes they perform and their contribution to life sustainability on the planet*. Bogotá: Nova. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702015000200007

Deng , L., Chen , H., Chen , Z., Liu , Y., Pu, X., & Song. (2009). *Proceso de eliminacion simultanea de sulfuro de hidrogeno del biogas y eliminacion de nitrogeno de las agas residuales porcinas*. Bioresoul Technol.

Discusiones técnicas de Gülzower. (2001). *Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial* (FNR ed., Vol. 15). Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Recuperado el 20 de Febrero de 2021, de https://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_94gfg_bd15.pdf

Durán Hernández, D. M. (2020). *Aprovechamiento energético de la codigestión anaeróbica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y residuos de cosecha de plátano para la producción de biogás*. Bogotá: Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química. Recuperado el 02 de 02 de 2022, de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/79232/1118556228.2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gabriel D; Deshusses, Marc A. (2003). *Adaptación de depuradores químicos existentes a filtros biperpercorantes para el control de emisiones de (H₂S)*. (A. d. América, Ed.) California, Riverside, CA, EE.UU: Department of Chemical and Environmental Engineering, University of California, Riverside, CA 92521.

Gropelli, E.; O. Giampaolli. (2001). *El camino de la Biodigestión; Ambiente y tecnología socialmente apropiada*. Santa Fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral. 188p.

INCONTEC. (2006). *Instalaciones para suministro de gas combustible destinadas a usos residenciales comerciales*. Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificacion (INCONTEC). Obtenido de

https://www.ugc.edu.co/pages/juridica/documentos/institucionales/NTC_2505_Instalaciones_Suministro_De_Gas.pdf

Joaquín Víquez Arias. (2018). ¿Cómo diseñar un filtro para biogás? La remoción de H₂S con oxido de hierro. *RedBioLAC*, 59.

Kuan, Y. S., Duu, J. L., & Xiangliang, P. (2012). Simultaneous biological removal of nitrogen–sulfur–carbon: Recent advances and challenges. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.12.006>

Martí, N. (2006). *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process*. Recuperado el 01 de Marzo de 2021, de <http://www.bookpump.com/dps/pdf-b/1123329b.pdf>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (12 de 11 de 2013). *Resolucion N°. 1541. 12 de noviembre de 2013*. Recuperado el 24 de 02 de 2021, de <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Resolucion-1541-de-2013.pdf>

Mosquera, J., Rangel , C., Cabeza, I., & Acevedo , P. (2019). Análisis de ciclo de vida y evaluación económica de un esquema de aprovechamiento de biomasa residual a través de co-digestión anaerobia. *Revista - RedBioLAC*, 38.

Ozturk, M. (2020). *Effective use of hydrogen sulfide and natural gas resources available in the Black Sea for hydrogen economy*. Ontario - Canadá: Clean Energy Research Laboratory, Faculty of Engineering and Applied Science, Ontario Tech. University, Ontario, Canada.

Pagliuso, J. D., Passig, F. H., & Villela H, L. C. (2002). *Odour treatment and energy recovery in anaerobic sewage treatment plants*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP: 13566-590, São Carlos, SP, Brasil. , Departamento de Hidráulica e Saneamento. Rua Padre Teixeira 1772, CEP 13560-210, S Carlos, SP, Brasil.: SHS Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda. Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.9091&rep=rep1&type=pdf>

Rao, S., Seetharama, N., Ratnavathi, C., Umakanth, A., & Dalal, M. (2010). Second generation biofuel production from sorghum biomass. En S. Rao. Coimbatore, India: Tamil Nadu Ag. University. Obtenido de <https://www.researchgate.net/profile/Ss-Rao-4/post/What-are->

steps-of-bioethanol-
production/attachment/59d63c50c49f478072ea7c62/AS%3A273749226524674%40144
2278309904/download/Second+generation+biofuel+production+from+Sorghum+biomas
s.pdf

Redondo, R., Cunha Machado, V., Baeza, M., Lafuente, J., & Gabriel, D. (2008). On-line monitoring of gas-phase bioreactors for biogas treatment: hydrogen sulfide and sulfide analysis by automated flow systems. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 391, 789-798. doi:<https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1007/s00216-008-1891-5>

Roa, Z. S. (2020). Guía del biogás, para el sector porcicola en Colombia. En *Acondicionamiento del biogás* (pág. 64). Porkcolombia - Fondo Nacional de la Porcicultura.

Rojas, C.J.; Contreras, H. Mosquera, Y.N. & Rodríguez, M.P. (2018). Determinación del potencial de biogás de diferentes sustratos para la codigestión anaerobia con excretas animales. Documento de Trabajo. Villavicencio: Universidad Santo Tomás. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/22656>

Salcedo Galarza, L. N. (2008). *Elaboracion y evaluacion de un BIOL frente a los abonos quimicos en un cultivo de pepino, en la parroquia Guayllabamba del Cantòn - Quito provincia de Pichincha*. Universidad Nacional de Loja, Area agropecuaria y de recursos naturales renovables. Loja: Area agropecuaria y de recursos naturales renovables. Obtenido de <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/5871/1/Salcedo%20Galarza%20Leonel.pdf>

Schieder, D., Quicker, P., Schneider, R., Winter, H., Precht, S., & Faulstich, M. (2003). Microbiological removal of hydrogen sulfide from biogas by means of a separate biofilter system: experience with technical operation. *Water Science and Technology*, 48, 209 - 212. Recuperado el 19 de 02 de 2021, de <https://iwaponline.com/wst/article/48/4/209/10932/Microbiological-removal-of-hydrogen-sulfide-from>

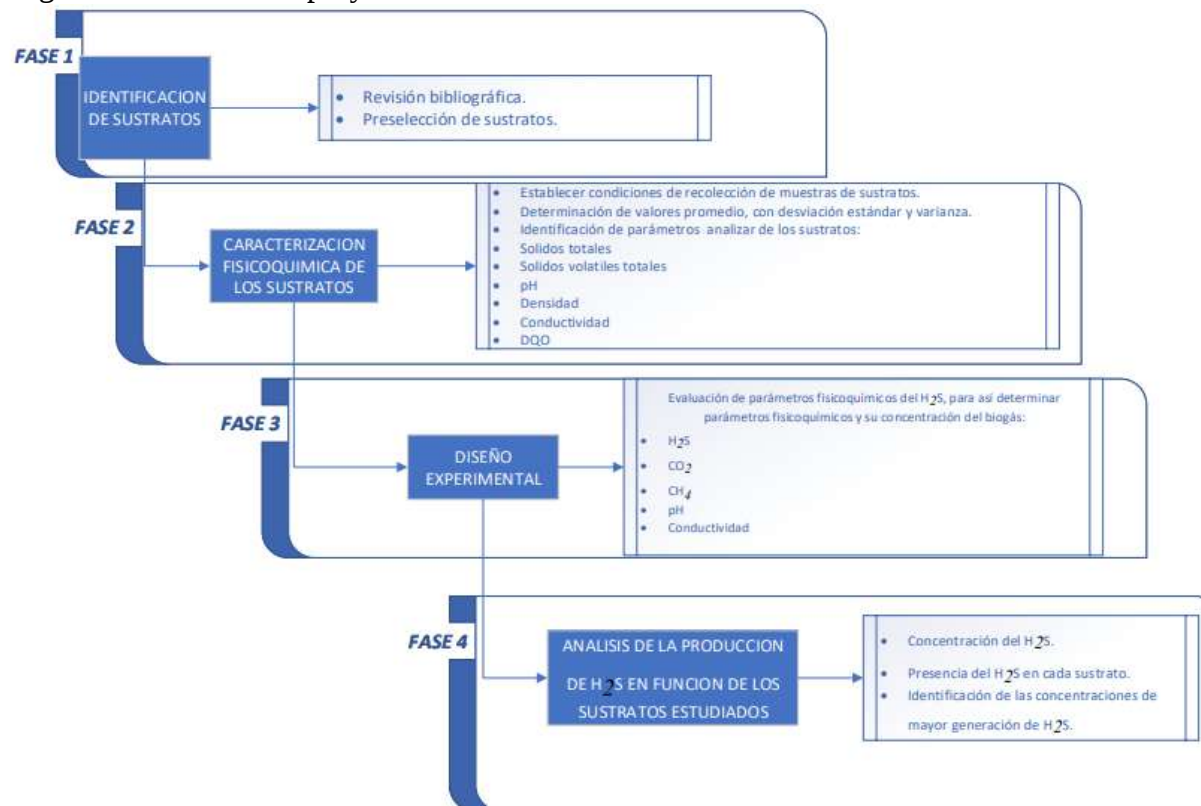
Tait, S., Harris, P. W., & McCabe, B. K. (2021). Biogas recovery by anaerobic digestion of Australian agro-industry waste: A review. *Journal of Cleaner Production*, 299(126876). doi:<https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1016/j.jclepro.2021.126876>

- Wang, L., B. W., Z. C., L. D., Song, L., Zheng, D., . . . Shuang, W. (2015). Efecto del inóculo y el tipo de sulfuro sobre la eliminación simultánea de sulfuro de hidrógeno del biogás y la eliminación de nitrógeno de los purines porcinos y el mecanismo microbiano. *Appl Microbiol Biotechnol*. doi:<https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1007/s00253-015-6916-3>
- Yuan, J., Longlong, D., Shuyan, L., Fan , Y., & Zhiye , Z. (2019). Use of mature compost as filter media and the effect of packing depth on hydrogen sulfide removal from composting exhaust gases by biofiltration. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 3762–3770. doi:<https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1007/s11356-018-3795-Z>
- Zheng, D., L. G., Chen , C., Yang, H., Liu, Y., Deng, L. W., & Fan, Z. (2012). Influencia de la profundidad de la capa de arena en la nitrificación parcial como pretratamiento de aguas residuales porcinas digeridas anaeróbicamente antes del anammox. *Biogas Scientific Research*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.058>

9. Anexos

9.1. Anexo 1 Metodología

Figura 1. Metodología de desarrollo del proyecto.



9.2. Anexo 2 Datos Fisicoquímicos Excretas Animales

Tabla N°1. Demanda Química de Oxígeno de las muestras crudas

Muestra	Absorbancia	DQO (mg O ₂ /L)	Factor de Dilución	DQO Muestra (mg O ₂ /L)	DQO Promedio (mg O ₂ /L)
Excretas Porcinas	-0,005	4,050	1000	4050	4861
Excretas Porcinas	-0,007	5,671	1000	5671	
Excretas Bovinas	-0,005	4,050	1000	4050	4456
Excretas Bovinas	-0,006	4,861	1000	4861	
Excretas Avícolas*	-0,005	4,050	1000	4050	4050
Excretas Avícolas*	-0,005	4,050	1000	4050	

*Codorniz

Tabla N°2. Fosfatos (P-PO₄) de las muestras crudas

Muestra	Absorbancia	Fosfatos (mg P- PO ₄ /L)	Factor de Dilución	Fosfatos (mg P-PO ₄ /L)	Fosfatos promedio (mg P-PO ₄ /L)
Excretas Porcinas	1,209	3,202	1000	3202	2849
Excretas Porcinas	0,509	1,248	2000	2496	

Excretas Bovinas	0,160	0,264	1000	264	253
Excretas Bovinas	0,152	0,242	1000	242	
Excretas Avícolas*	0,633	1,597	2000	3194	4039
Excretas Avícolas*	1,810	4,884	1000	4884	

*Codorniz

Tabla N°3. Sulfatos (P-PO₄) de las muestras crudas

Muestra	Absorbancia	Sulfatos (mg S-SO ₄ /L)	Factor de Dilución	Sulfatos (mg S-SO ₄ /L)	Sulfatos promedio (mg S-SO ₄ /L)
Excretas Porcinas	0,321	0,00346	1000	3,46	3,45
Excretas Porcinas	0,319	0,00344	1000	3,44	
Excretas Bovinas	0,299	0,00322	1000	3,22	3,16
Excretas Bovinas	0,287	0,00310	1000	3,10	
Excretas Avícolas*	0,488	0,00527	1000	5,27	5,02
Excretas Avícolas*	0,441	0,00476	1000	4,76	

*Codorniz

- * La absorbancia se lee a la longitud de onda que dice la gráfica correspondiente.
- * Con la ecuación de la recta se encuentra el valor en mg/L.
- * Después ese valor se multiplica por el factor de dilución.

Observaciones:

- *El valor de fosfatos no influye en el proceso anaerobio, pero si permite inferir la calidad del biol producido, ya que el fósforo es un elemento primordial para el uso posterior del biol del biodigestor como fertilizante.
- *Los valores de sulfatos pueden indicar la probabilidad de que ese contenido de azufre de la biomasa se transforme en H_2S en el proceso anaerobio.