

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea del CRAI-Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la CRAI-Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan finalidad académica, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

**Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-Biblioteca
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

Estudio del potencial de la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de estiércol.

Oscar Javier Solano Galvis

Trabajo de grado para optar el título de Químico Ambiental

Directora del Proyecto

Angélica ma. Candela Soto, Química, *Msc. Ph.D.*

CO-Directora:

Olga Lucia Bayona, Química, *Msc.*

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de ingenierías y arquitectura

Facultad de química ambiental

2018

Dedicatoria

Dedico de manera especial a mi hermana María Paula pues ella es la razón por la que quiero seguir adelante, para darle lo mejor en la vida y enseñarle que el estudio es la herencia más preciada que nos puede dejar nuestros padres. A mi padre, a mi madre y a mi abuela Cecilia, pues ellos siempre han creído en mí, me han dado todo lo necesario para salir adelante, ser un profesional con valores y ser un ejemplo para mi hermana. A mi primo Juan Carlos, quien con sus deseos quería verme siempre triunfar, además fu un claro ejemplo de que las personas permanecen en las memorias y que desde el cielo nos apoyan.

Finalmente dedico este trabajo a DIOS, pues me ha colmado de bendiciones con una excelente familia y gracias a él he podido sacar este proyecto adelante a pesar de muchos obstáculos, pues en DIOS todo se puede.

Agradecimientos

Agradezco a todos mis compañeros con los que pude compartir esta experiencia tan especial como lo es la etapa universitaria, especialmente a Yulieth y Katherin quienes fueron mi equipo de trabajo; a los profesores de la facultad de química ambiental pues con conocimiento y paciencia nos brindan el camino de la rectitud y del profesionalismo.

A la Universidad Santo Tomás (USTA) y su programa de química ambiental, pues nos ofrecen buenas instalaciones con buena dotación tecnológica y demás herramientas con las que se pudo llevar a cabo este proyecto. Agradezco el apoyo y soporte financiero de Colciencias (Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia) – Proyecto número FP44842-38-2017.

Especial agradecimiento al grupo de investigación de nuevos materiales y energías alternativa (GINMEA). A mi directora de proyecto Angélica María Candela y a mi codirectora Olga Lucía Bayona por la orientación, motivación y seguimiento necesario para sacar adelante este trabajo de investigación.

Tabla de contenido

	Pág.
Lista de siglas, símbolos, acrónimos y abreviaturas	11
Glosario	13
Introducción	16
1. Planteamiento del problema	17
2. Justificación.....	18
3. Objetivos	20
3.1. Objetivo general.	20
3.2. Objetivos específicos.....	20
4. Marco de referencia.....	21
4.1. Marco de antecedentes.....	21
4.2. Marco conceptual	25
4.2.1. Etapas de la digestión anaerobia.	25
4.2.1 Variables fisicoquímicas del proceso DA.....	27
4.2.2. Biogás.	30
4.2.3. Tipos de reactores anaerobios.	30
4.2.3.1. Reactores discontinuos o tipo Batch (RB).	31
5. Metodología	31
5.1. Procedimiento experimental	32
5.1.1. Recolección y almacenamiento de las materias primas	32
5.1.2. Diseño de birreactores	32

5.1.3.	Caracterización de parámetros fisicoquímicos.....	33
5.1.3.1.	Determinación de nutrientes-CHONS	34
5.1.3.2.	pH	35
5.1.3.3.	Alcalinidad (AT) y ácidos grasos volátiles (AGV's).	35
5.1.3.4.	Sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV).....	36
5.1.4.	Azúcares y AGV's individuales.....	36
5.1.5.	Medición de la cantidad de biogás producido.	37
5.1.6.	Determinación del potencial de biometanización (BPM).	38
5.1.7.	Caracterización del biogás.	39
6.	Análisis y resultados.....	39
6.1.	Caracterización fisicoquímica de los inóculos utilizados (EO, EC y EB).	39
6.2.	Monitoreo de la digestión anaerobia	41
6.2.1.	Monitoreo del potencial de hidrógeno (pH).	42
6.2.2.	Sólidos totales (ST) y Sólidos volátiles (SV).	43
6.2.3.	Ácidos grasos volátiles y Alcalinidad total.	44
6.2.4.	Determinación de Ácidos grasos individuales.	46
6.2.5.	Determinación de azúcares.....	48
6.3.	Desplazamiento alcalino.....	52
6.4.	Potencial de biometanización de las mezclas utilizadas.....	54
6.5.	Caracterización del gas producido.....	55

7.	Conclusiones y recomendaciones.....	57
8.	Divulgación de Resultados.....	59
9.	Bibliografía.....	60
	Apéndices.....	70

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Principales reacciones ocurridas durante el proceso de DA.</i>	27
Tabla 2. <i>Valores de tiempo de retención hidráulica en diferentes materias prima.</i>	29
Tabla 3. <i>Composición química del biogás.</i>	30
Tabla 4. <i>Condiciones de operación en que se llevó a cabo la técnica de HPLC.</i>	37
Tabla 5. <i>Caracterización fisicoquímica de los inóculos ovino, caprino y bovino.</i>	40
Tabla 6. <i>Relación C/N de los inóculos y mezclas utilizadas.</i>	41
Tabla 7. <i>Cantidad de ST y SV para la mezclas M1 (EO 12,3%-EB 8,7%-EC 4%) y M2 (EO 8,7%-EB 12,3%-EC 4%).</i>	43
Tabla 8. <i>Tiempos de retención para cada AGV analizado</i>	46

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Esquemas de etapas de la digestión anaerobia.....	26
<i>Figura 2.</i> Esquema del diseño metodológico.	32
<i>Figura 3.</i> Diseño del biorreactor.....	33
<i>Figura 4.</i> Montaje para la medición del biogás generado.	38
<i>Figura 5.</i> Seguimiento de pH en las monodigestiones, durante las tres semanas del proceso.	42
<i>Figura 6.</i> Seguimiento de pH en las mezclas establecidas, durante las cinco semanas del proceso.	42
<i>Figura 7.</i> Relación AGV/AT para cada una de las monodigestiones.....	44
<i>Figura 8.</i> Relación AGV/AT de las mezclas establecidas.....	45
<i>Figura 9.</i> Curva de calibración para cuantificación del ácido butírico e isobutírico....	46
<i>Figura 10.</i> Curva de calibración para cuantificación del ácido acético y propiónico .	47
<i>Figura 11.</i> Cuantificación de AGV's para M1 y M2.....	47
<i>Figura 12.</i> Patrón utilizado para la cuantificación de arabinosa, celobiosa, glucosa y xilosa.....	49
<i>Figura 13.</i> Curva de calibración para la determinación de glucosa.	49
<i>Figura 14.</i> Curva de calibración para la determinación de xilosa.	50
<i>Figura 15.</i> Curva de calibración para la determinación de arabinosa.	50
<i>Figura 16.</i> Curva de calibración para la determinación de celobiosa.....	50
<i>Figura 17.</i> Cuantificación de glucosa y arabinosa para M1 y M2.....	51

Figura 18. Gráfico de la cantidad de biogás producido para cada uno de los reactores durante 23 días de estudio.52

Figura 19. Cantidad de biogás producido para M1 y M2 durante el periodo de estudio.53

Figura 20. Relación de PBM (mL de biogás/ g de SV) de las mezclas 1 y 2 durante las 5 semanas de estudio.54

Figura 21. Composición del biogás de la M1 al décimo día del proceso.....56

Figura 22. Composición del biogás de la M2 al décimo día del proceso.....56

APÉNDICES

	Pág.
Apéndice A. Lista de equipos y materiales utilizados en el presente estudio.....	70
Apéndice B. Tabla de reactivos utilizados.....	71
Apéndice C. Seguimiento parámetros agv y at para cada reactor.....	72
Apéndice D. Producción de biogás de cada inóculo durante un periodo de tiempo de 3 semanas.....	73
Apéndice E. Producción de biogás de las mezclas utilizadas m1 y m2, durante un periodo de 5 semanas.....	74
Apéndice F. Resultado obtenidos en el análisis por cromatografía de gases.....	75

Lista de siglas, símbolos, acrónimos y abreviaturas

Ac.	Ácido
AGV	Ácidos grasos volátiles
AO	Ácidos orgánicos
ART	Azúcares reductores totales
AT	Alcalinidad total
BIO-DI	Biodigestor
C	Carbono
CH_4	Metano
CO	Monóxido de carbono
CHON	Carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno
CO_2	Dióxido de carbono
DA	Digestión anaerobia
EtOH	Etanol
(g)	Gramos
GEI	Gases de efecto invernadero
H	Hidrógeno
HCl	Ácido clorhídrico
HPLC	Cromatografía líquida de alta eficiencia
Kcal	Kilocalorías
Kg	Kilogramo
Kg	Kilogramos de deyección
MO	Materia orgánica
mL	Mililitros
N	Nitrógeno
NaOH	Hidróxido de sodio
NH_3	Amoniaco
N_2O	Óxido nitroso

O	oxígeno
PBM	Potencial de biometización
PH	Potencial de hidrógeno
RIS	Relación inóculo-sustrato
RSOU	Residuos sólidos orgánicos urbanos
ST	Sólidos totales
ST	Sólidos volátiles
THR	Tiempo de retención y velocidad de carga orgánica
TR	Tiempo de retención
°C	Grados Celsius

Glosario

Anaerobios: Son organismos capaces de desarrollarse en ausencia de oxígeno (Negroni, 2009).

Biocombustible: Es un combustible natural, compuesto por sustancias orgánicas. Es utilizado como fuente de energía en motores de combustión interna (Ganduglia, 2009).

Biodigestor: Es un depósito hermético utilizado para almacenamiento de desechos de animales y de cultivos mezclado con agua, y se utiliza para la producción de biogás (Hogares juveniles campesinos, 2004).

Deyección: termino relacionado con excretas liquidas y solidas de animales (Bareau veritas, 2008).

Ensilaje: Es un método para conservación anaerobia del pasto con mínima pérdida de nutrientes (Cárdenas, Solorio, & Sandoval, 2004).

Escorrentía: Capacidad de agua lluvia de exceder la infiltración del suelo (Nuñez, 2001).

Eutrofización: Exceso de nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) en aguas superficiales, lo cual genera limitación en el crecimiento de la materia orgánica presente en la fuente hídrica (Ongley, 1997).

Fermentación: Proceso bioquímico en el cual una sustancia orgánica se transforma en una más sencilla por acción de bacterias anaerobias (Martinez, 2014).

Hidrogenofílicas: Son bacterias que utilizan el hidrógeno para reducir el anhídrido carbónico y producir metano (Cabildo, Claramunt, Cornago, & Otros, 2012).

Homoacetogénicas: Bacterias capaces de crecer a partir de dióxido de carbono e hidrógeno para generar acetato (Cabildo et al., 2012).

Mesófilas: Organismos capaces de crecer en un intervalo de temperatura entre 30-37°C (Ganduglia, 2009).

Metahemoglobina: Forma oxidada de la hemoglobina, responsable del transporte de la sangre al organismo. Este componente al estar formado de hierro en forma férrica, en grandes concentraciones es incapaz de transportar el oxígeno en el cuerpo (Miale, 1985).

Metahemoglobinemia: Es una enfermedad producida en la sangre debido a niveles muy altos de metahemoglobina, lo cual genera dificultad en liberar el oxígeno a los tejidos corporales (Ruza, 2003).

Termófilos: Microorganismos con temperatura óptima de crecimiento entre 50-60°C (Tortora & Funke, 2007).

Resumen

Con el paso del tiempo, cada vez más es común ver los avances tecnológicos que se implementan en los países en vía de desarrollo mediante el uso de fuentes de energía alternativa que den solución a la demanda de combustibles fósiles y a la gran problemática socioambiental, como son los altos costos y la contaminación generada al medio ambiente.

El biogás es una fuente energética generada a partir de residuos biodegradables, los cuales por acción fermentativa de bacterias anaerobias degradan la materia orgánica. Este tipo de energía es utilizado principalmente en el sector agroindustrial como solución a la problemática sobre el tratamiento de residuos generados.

En este proyecto de investigación se estudió el tratamiento de algunos residuos ganaderos como es el caso de las deyecciones de la ganadería ovina, caprina y bovina, con el fin de aprovechar la generación de biocombustibles como el biogás y a su vez la producción de abonos ecológicos. El estudio contempló la caracterización y el control de la biodigestión, mediante el seguimiento de ciertos parámetros fisicoquímicos como ácidos grasos volátiles, sólidos totales, sólidos volátiles, alcalinidad, pH, C, H, O, N, S y azúcares del estiércol bovino (EB), estiércol ovino (EO) y estiércol caprino (EC) y mezclas establecidas de los tres tipos de estiércol; además, se midió la producción de biogás en un periodo de 3 semanas para los reactores que contenían el estiércol de manera individual y 5 semanas para las mezclas, finalmente se realizó la caracterización del biogás producido por las mezclas al décimo día del proceso. Los resultados obtenidos muestran que el potencial de biometanización para las mezclas M1 y mezcla M2 fue de 48,27 y 54,682 mL de metano/ g de SV, respectivamente.

Palabras claves: biodigestor, biogás, digestión anaerobia, estiércol bovino, estiércol ovino.

Introducción

Debido a la sobreexplotación de las fuentes de energía fósil producida en los últimos siglos por el uso del petróleo y el carbón, el impacto que estas fuentes generan al medio ambiente ha motivado el interés en el uso de fuentes renovables que mitiguen la contaminación y se le den un valor agregado a los residuos agroindustriales generados.

Uno de los principales problemas que se presenta en las fincas pecuarias es el inadecuado tratamiento que se le da a la materia orgánica generada, por ejemplo el estiércol de los animales en muchos casos es incinerado liberando grandes concentraciones de N_2O , CO_2 y CH_4 , creando un fuerte impacto medio ambiental en la atmósfera, suelo y fuentes hídricas cercanas (Hristov et al., 2013). Otra consecuencia de su indebido uso, es la sobrecarga de nutrientes del suelo, los cuales al filtrarse a través de escorrentías generan contaminación de aguas subterráneas o superficiales, debido a la lixiviación del nitrato y podría verse involucrada la salud humana (Pinos et al., 2012).

La Digestión Anaerobia (DA) es un procedimiento fermentativo que en ausencia de oxígeno descompone la materia orgánica (MO) proveniente de estiércol de animales y residuos agroindustriales, los cuales mediante un proceso microbiano son transformados en combustible (biogás) y fertilizantes naturales (biol) (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2007).

Este proyecto se desarrolla como solución a la contaminación producida por combustibles fósiles y al tratamiento de los desechos generados en bovinos, caprinos y ovinos, principalmente en la finca San Isidro ubicado en el municipio de Sabana de Torres- Santander; debido a que es uno de los departamentos con mayor influencia en la crianza y ceba de la ganadería colombiana.

1. Planteamiento del problema

Los residuos provenientes de cultivos y estiércol de animales, generan contaminación olfativa debido a la emanación de ciertos gases como dióxido de carbono y gas metano; además, estudios realizados han relacionado que los residuos provenientes de la actividad ganadera contribuyen al calentamiento global, debido a la emisión de estos gases de efecto invernadero (GEI) responsables del cambio climático (Bell, M; Wall, E; Rusell, G; Simm, G; Stott, 2011). La acumulación de estiércol ganadero y su indebido uso en el suelo, genera sobrecarga de nutrientes, este al filtrarse a través de escorrentías contamina el agua subterránea o superficial, debido a la lixiviación del nitrato y contenido de fósforo el cual genera un gran impacto ambiental (eutrofización) y podría verse involucrada la salud humana al provocar Metahemoglobinemia (Pinos et al., 2012).

La gran cantidad de organismos patógenos presentes en el estiércol de animales, genera una preocupación en la salud pública. Bacterias como *Salmonella* y *Escherichia coli* están presentes en desechos animales y son responsables de enfermedades como diarrea, intoxicaciones alimentarias, fiebre, etc. (Sierra et al., 2016). Un problema social que se presenta en fincas muy lejanas al casco urbano, es la dificultad de brindar los servicios básicos como electricidad y gas natural para generar mayor calidad de vida; según la asociación colombiana de generadores de energía (ACOLGEN) para agosto del 2017, 2,5 millones de colombianos no tienen acceso a energía eléctrica (Saenz, 2017).

Una solución para la problemática debido al mal tratamiento de los residuos ganaderos, las contrariedades en la salud que estos pueden ocasionar y principalmente mejorar la calidad de vida de la comunidad que habita en zonas rurales; es el uso de biodigestores anaerobios que permitan la generación de biogás, de esta forma beneficiarse con una fuente de energía renovable y amigable con el medio ambiente.

El departamento de Santander ha sido uno de los principales aportadores del hato ganadero colombiano, principalmente en provincias como Vélez y Mares se dedican a la cría y/o ceba de ganado bovino, caprino y ovino. La mala gestión de residuos que genera la ganadería es una problemática debido a la gran cantidad que se produce; los ovinos con un intervalo de peso entre 30-75 Kg, genera diariamente entre el 4-5% de su peso en deyecciones; y para el caso de bovinos con un intervalo de peso entre 250-600 Kg producen una cantidad diaria de excremento entre el 5-6% de su peso (Avcioglu & Turker, 2012).

Con el fin de disminuir la contaminación generada al medio ambiente y brindar una posible solución a la demanda energética que se presenta en Colombia, este proyecto tiene como finalidad el aprovechamiento de residuos provenientes de la ganadería ovina, caprina y bovina para generar biogás por medio de un proceso de digestión anaeróbica.

2. Justificación

El metano es un GEI 23 veces más incidente al calentamiento global que el CO_2 ; un estudio realizado en el 2014 por un grupo de expertos del cambio climático muestra que de los sectores industriales el sector pecuario contribuye al 25% de emisiones de GEI y el CH_4 es responsable del 16 % de las emisiones globales (Edenhofer, Pichs-Madruga, Sokona, & y otros, 2014). Una alternativa para la mitigación en el medio ambiente de estos gases es realizar un tratamiento adecuado del estiércol generado en la agroindustria. Actualmente se ha venido empleando la DA como método para obtener energía renovable y reutilización de estos residuos transformándolos en fertilizantes naturales, dándole un valor agregado a este tipo de residuos. Por otra parte este método de obtención energética por esta vía de DA, puede verse afectado por diversos factores

como la naturaleza del sustrato, pH, presencia de tóxicos e inhibidores, nutrientes, y temperatura (Acosta & Abreu, 2005).

El biogás puede ser una solución alternativa en las zonas rurales en donde muchas veces no es posible encontrar el servicio público de primera necesidad como es el caso de energía eléctrica y gas natural; la gran ventaja que tienen las personas en esta situación es la variedad de cultivos y animales para uso alimenticio y generar ingresos. Este gas natural puede ser usado como fuente de energía a partir de residuos de la biomasa y desechos de animales, que representa un beneficio debido a su aplicación para cocción de alimentos, calefacción en tierras muy frías, generación de energía eléctrica y producción de abonos naturales (Ministerio de Minas y Energía de Colombia & Unidad de Planeación Minero Energética, 2015).

El adecuado manejo de la biomasa residual en Colombia proveniente de cultivos, industria pecuaria y residuos sólidos orgánicos urbanos (RSOU), representa una fuente de ingresos debido al valor agregado que se les da al ser transformados y utilizados como una fuente energética que mitigue y prevenga la contaminación generada en los suelos, la atmósfera y fuentes hídricas (Escalante, Orduz, Zapata, Cardona, & Duarte, 2010). Con el fin de mejorar la cantidad de biogás producido por cada una de las materias primas (EB, EC y EO), se realizó el estudio de dos mezclas; las cuales varía la cantidad de estiércol ovino y bovino presente en relación, ya que la cantidad de estiércol caprino se mantuvo constante en ambas mezclas.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general.

Evaluar el potencial de la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de la mezcla de estiércol ovino, caprino y bovino, mediante el desarrollo de un biorreactor a escala de laboratorio.

3.2. Objetivos específicos.

- Caracterizar el estiércol ovino, caprino y bovino, con el fin de determinar su viabilidad para su uso en el proceso de digestión anaerobia.
- Controlar el proceso de digestión anaerobia mediante la medición de parámetros fisicoquímicos.
- Determinar el potencial de biometanización a partir de la caracterización de parámetros fisicoquímicos de las respectivas mezclas de estiércol, para determinar el sistema de mayor producción de biogás.
- Caracterizar la composición del biogás producido, mediante la técnica por cromatografía de gases.

4. Marco de referencia

4.1. Marco de antecedentes

El uso de energías alternativas que reduzcan el calentamiento global cada vez son más usadas en países industrializados, tal es el caso de países como gran Bretaña, Alemania, Italia, España, Francia y Suecia; considerados como los principales productores de biogás para uso energético principalmente. Los sustratos utilizados para este fin son residuos de vertederos (64%), residuos urbanos e industriales (19%) y la Co-DA de residuos agropecuarias (17%); además, la producción italiana de biogás a partir de desechos animales en 2005 fue de 26 GWh, representando el 2.2% del biogás total producido a partir de biomasa (Tricase & Lombardi, 2009). Otro país europeo que está impulsando el uso de energía de la biomasa es Polonia debido a la gran cantidad de fincas con finalidad agrícola y la actividad ganadera, en el 2013 cerca del 10% de tierras cultivables se dedicaron a la obtención de gas metano principalmente a la Co-DA a partir de biomasa y con alta eficiencia energética como la alfalfa ($85-94^{GJ}/ha$), ensilaje de maíz ($87-145^{GJ}/ha$) y remolacha azucarera (pulpa y melaza) ($220^{GJ}/ha$) con residuos ganaderos; para el año 2014 el potencial eléctrico total en las plantas de biogás agrícola instaladas en Polonia fue de 63.34MWe, mientras que la energía térmica fue de 63.05 MWt (Piwowar, Dzikuc, & Adamczyk, 2016).

El crecimiento económico de países en vía de desarrollo genera mayor consumo de energía, este el caso de malasia cuya demanda total de energía en el 2010 fue más de $100^{GW}/h$ lo cual generó una explotación de los combustibles fósiles y su agotamiento; una solución para esta problemática fue la implementación en el 2011 de una nueva política ambiental con el fin de generar en el 2015 una producción de 985 MW de energía renovable a partir de desechos de

animales de granja (cabras, ovejos, bovinos y pollos) y residuos de la agroindustria (Abdeshahian, Lim, Ho, Hashim, & Lee, 2016).

Estados Unidos uno de las potencias industriales y uno de los principales consumidores de energías fósiles, en los últimos años ha implementado el uso de producción de biogás a partir de lodos provenientes del proceso de tratamiento de aguas residuales. En el 2014 el 10% de las PTAR en este país utiliza el biogás generado para producción de electricidad y en procesos de calefacción, aportando entre 3-4% de la demanda eléctrica, equivalente a 30.2 mil millones de KW por año. Las ventajas que han obtenido en las empresas que han implementado el uso de la DA han sido reducción de la huella de carbono en sus operaciones, maximización de la producción energética, y la reducción de importaciones energéticas (Shen, Linville, Urgan-Demirtas, Mintz, & Snyder, 2015).

Colombia al ser un país en vía de desarrollo uno de sus principales inconvenientes es el tratamiento y disposición de residuos; actualmente se ha incentivado el uso de la DA como solución a esta problemática. En el 2012 en la ciudad de Pereira, se realizó un estudio con el fin de evaluar el biogás producido a partir de biosólidos resultantes del tratamiento de aguas residuales; obteniendo producciones mayores a 850 cm^3 de biogás durante un periodo de estudio entre 50 y 60 días, además se evidencio una actividad metanogénica relativamente baja pues se obtuvieron valores cercanos a $0,1 \text{ gDQO/gSTV} \cdot \text{día}$ (Mosquera & Martinez, 2012). Por otra parte en el 2014 en la universidad del valle ubicada en Cali, se evaluó la producción de metano generado a partir de biorresiduos de origen municipal compuesto en su mayoría por residuos de alimentos no procesados, los cuales debido a los bajos valores de pH fue necesario el uso de un agente alcalino con el fin de evitar la acidificación de los reactores. Al cabo de un mes de estudio se

determinaron los valores del potencial de biometanización arrojando valores entre 100-128mL de metano/ gSV (B. Parra, 2014)

La Universidad de Guanajuato (México), realizó un estudio en el año 2006 sobre la producción de biogás a partir de estiércol caprino a escala laboratorio; el reactor fue expuesto a temperatura mesofílica (35°C) y con agitación manual una vez al día, este proceso de DA se mantuvo durante 34 días. Durante el desarrollo experimental, al reactor se le evaluó parámetros como el pH, la presión y la temperatura, además se le realizó la caracterización cromatográfica del biogás, con el fin de determinar el porcentaje de metano presente a los 7, 14 y 21 días respectivamente. Este estudio demostró que a medida que pasa el tiempo de retención, aumenta la presión acumulada en el reactor y además el porcentaje de metano producido es mayor; pues se registró a los 7 días un contenido de metano presente en el biogás fue del 22%, a los 14 días de la experimentación aumento la presencia de metano a un 30% y finalmente a los 21 días el metano presente en el biorreactor fue del 60 %, indicando que el proceso de biodigestión y el control de los parámetros involucrados tuvo un alto grado de eficiencia (Magaña, Torres, Martínez, Sandoval, & Hernández, 2006).

En el 2015 se realizó un estudio sobre la co-digestión anaeróbica de estiércol ovino y bovino, con el fin de determinar la mezcla que produjera mayor cantidad de biogás; para el experimento anterior, se llevaron a cabo 5 biorreactores a temperatura ambiente, los cuales contenían lecho de oveja y estiércol de ganado (CM) en proporciones 0%, 25%, 50%, 75% y 100% respectivamente. Durante el desarrollo experimental a los reactores se le midieron parámetros fisicoquímicos iniciales y finales como pH, conductividad eléctrica, sólidos totales, sólidos volátiles, nitrógeno (N), potasio (K), fósforo (P), celulosa y hemicelulosa. Los resultados obtenidos muestran que los reactores con la digestión de mezclas $\geq 50\%$ de estiércol bovino (CM100, CM75 y CM50)

arrojaron potenciales de biogás significativamente mayores 212, 221, 211 LCH_4 / KgSV respectivamente, en comparación con el biorreactor que contenía solamente estiércol ovino (CM 0%) el cual fue de 188 LCH_4 / KgSV; lo anterior para un tiempo de estudio de 21 semanas. Además, se demostró que los reactores con relación $\leq 25\%$ de inóculo bovino (CM 25% y CM 0%) presentaron una inhibición durante el proceso de DA, debido al gran contenido lignocelulósico del lecho ovino lo cual evita el ataque microbiano y enzimático de la celulosa y la hemicelulosa, haciendo inaccesibles en el proceso de hidrólisis y por ende generando menor producción energética (Cestonaro et al., 2015).

Pan & Sukasem utilizaron granos, elote y cáscara de maíz para hacer una Co-digestión anaerobia con 3 tipos de estiércol (cerdo, bovino y caprino). A los residuos elote y cáscara de maíz se le realizaron un pre-tratamiento mediante una molienda y se mantuvieron en una solución de NaOH 2% durante 48 horas a temperatura ambiente, con el fin de reducir la cantidad de hemicelulosa y lignina. Este estudio se llevó a cabo durante un mes, la proporción residual de estiércol y maíz fue 1:1 en los reactores, y se mantuvieron a una temperatura de 37°C. Los resultados obtenidos muestran que la co-digestión seca con estiércol de cabra con cáscara de maíz fue la mejor condición que produjo 46.13% de metano al finalizar el proceso, además presentó un potencial de biometanización de 5.045,8 ml / gVS, equivalente a un valor de calentamiento de 6.53 MJ / M^3 , (Pan & Sukasem, 2017).

Un estudio realizado en china por Li y colaboradores, evaluaron la viabilidad de Co-digerir estiércol ovino (EO) con residuos ricos en carbono como el papel corrugado (PC) y papel desechado de oficina (PO), en diferentes relaciones inóculo: sustrato para la producir metano. Los rendimientos más altos de metano fueron de 151,62 y 198,85 ml / g-VS, los cuales se obtuvieron al finalizar el periodo de estudio (45 días), para las Co-digestiones de EO con (PC) a razón de 4:1

(EO:PC) y EO con PO a razón de 2:3 (EO:PO), respectivamente. Por otra parte, en todos los sistemas de estudio se obtuvieron porcentajes de metano entre el 40%-55% en su composición; siendo la mono-digestión PO, la que mayor cantidad metano presentó (55%) al finalizar el proceso (Li et al., 2018).

4.2. Marco conceptual

El proceso de DA es un sistema natural anóxico en el cual el sustrato (residuos orgánicos) por acción bacteriana es transformado en energía y abonos orgánicos que estimulan el crecimiento de las plantas, contribuye a la disminución de plagas y aumentan la fertilidad del suelo (FONCODES, 2014), (Herrero, 2006).

4.2.1. Etapas de la digestión anaerobia. La DA es un proceso digestivo utilizado para producción energética en ausencia de oxígeno se realiza en cuatro fases para la degradación completa del sustrato (Kumar, 2009). La figura 1 muestra el esquema general de la DA y las bacteria que participan en este proceso.

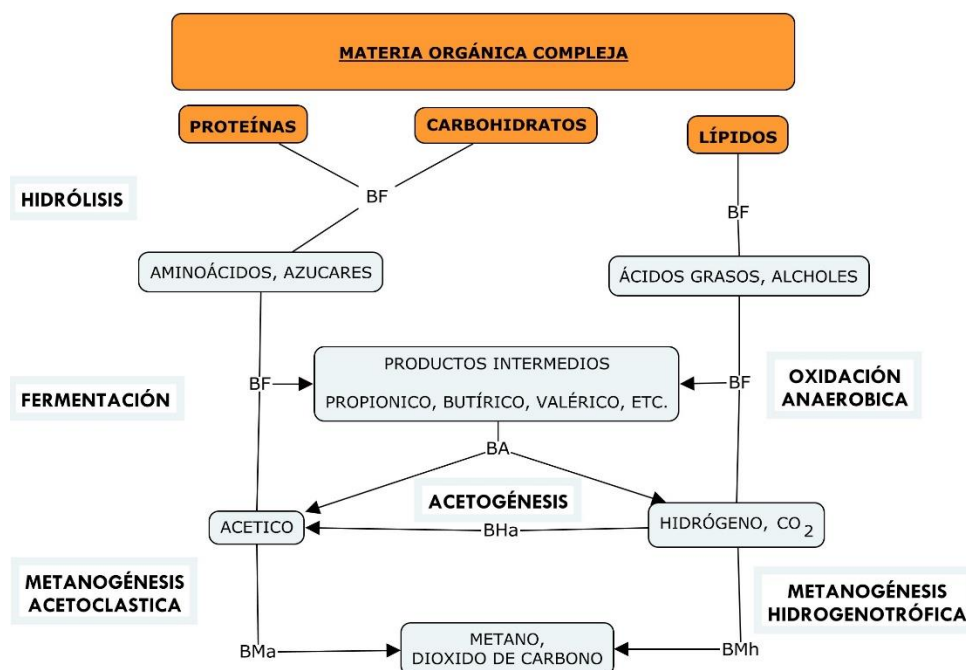


Figura 1. Esquemas de etapas de la digestión anaerobia.

Fuente: Modificado de (Pavlostathis & Giraldo, 1991).

Las siglas indican la población bacteriana responsable del proceso: (BF): bacterias fermentativas; (BA): bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; (BHa): bacterias homoacetogénicas; (BMh): bacterias metanogénicas hidrogenofílicas; (BMa): bacterias metanogénicas acetoclásticas.

La hidrólisis es la etapa encargada de convertir compuesto orgánicos complejos e insolubles en agua (polisacáridos, proteínas y lípidos), en compuestos sencillos y fácilmente solubles en agua (azúcares, los aminoácidos, los ácidos grasos y los alcoholes) por acción de enzimas producidas por bacterias fermentativas (Bermudez, Canovas, Manjon, & y otros, 1987). La siguiente etapa del proceso es la acidogénesis, en esta etapa los compuestos orgánicos solubles en agua son transformados rápidamente en ácidos orgánicos volátiles (ácido acético, propiónico, butírico, etanol, láctico, etc.), esta etapa es llevada a cabo por bacterias anaerobias (Pandey, Ndegwa, Soupir, Alldredge, & Pitts, 2011). Bacterias como *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter*

wolini se encargan de degradar compuestos como el Etanol, ácidos grasos y ciertos aromáticos en productos como acetatos e hidrogeno, esta etapa es conocida como acetogénesis (Varnero, 2011).

Finalmente en la metanogénesis o biometanización ocurre un proceso lento en cual bacterias acetoclásticas transforman el ácido acético en CH_4 y CO_2 ; y por otra parte están las bacterias hidrogenofílicas encargadas de convertir hidrogeno y CO_2 en CH_4 gaseoso (Castillo, E.; Vergara, M.; Sandoval, C.; Cristancho, D.; Arenas, L.; Martinez, A.; Hernandez, M.; Luna, M.; Castillo, 2007). Las principales reacciones bioquímicas que se presentan en el proceso de DA se muestran a continuación en la tabla 1.

Tabla 1.

Principales reacciones ocurridas durante el proceso de DA.

TIPO DE REACCIÓN	ECUACIÓN
Fermentación de glucosa a acetato	$Glucosa + 4H_2O \rightarrow CH_3COO^- + 4H^+ + 4H_2$
Fermentación de glucosa a butirato	$Glucosa + 2H_2O \rightarrow C_4H_7O_2 + 2HCO_3^- + 3H^+ + 2H_2$
Fermentación de butirato a acetato e H_2	$Butirato + 2H_2O \rightarrow 2 CH_3COO^- + H^+ + H_2$
Fermentación de propionato a acetato	$Propionato + 3H_2 \rightarrow CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + H_2$
Acetogénesis a partir de H_2 y CO_2	$HCO_3^- + H^+ + H_2 \rightarrow CH_3COO^- + 2H_2O$
Metanogénesis a partir de H_2 y CO_2	$HCO_3^- + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 3H_2O$
Metanogénesis a partir del acetato	$Acetato + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^- + H^+$

Fuente: (Zinder & Koch, 1984).

4.2.1 Variables fisicoquímicas del proceso DA. La DA es un proceso capaz de producir ciertos cambios debido a variables externas e internas, con las cuales sabiendo su utilidad se puede generar mayor eficacia en la producción de biogás (Quintero & Rondon, 2012).

- **Temperatura**

La temperatura de los biodigestores influye directamente en la velocidad de las reacciones biológicas, esto implica que las variaciones fuertes de temperatura intervienen en la actividad

metabólica de las bacterias presentes. Los organismos anaerobios tienen mayor actividad en intervalos de temperatura mesofílicas y termofílicas (Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, Kohli, & Rana, 2004).

- **pH y alcalinidad**

El valor del pH óptimo de los biodigestores debe estar en un intervalo de 6-8, debido a que valores menores representan un biogás escaso energéticamente originado por el poco contenido de CH_4 . Por otra parte, si el pH es muy alto representa una inhibición de las bacterias anaerobias debido a la presencia de NH_3 (Marti, 2006).

- **Relación inóculo-sustrato**

La cantidad de sólidos volátiles del sustrato va influir inversamente con la producción de metano, porque al aumentar la cantidad de carga orgánica genera una saturación en la fase de hidrólisis. (Eskicioglu & Ghorbani, 2011).

- **Ácidos grasos volátiles (AGV)**

Este tipo de ácidos lo conforma principalmente el ácido acético, aunque también es posible encontrar en pequeñas cantidades ácidos propiónico, butírico y valérico. La acumulación de los AGV disminuye significativamente el pH, este efecto se puede mitigar manteniendo el pH del medio óptimo (Mejia, 1996).

- **Potencial de biometización (PBM)**

Este factor determina el mayor rendimiento de producción de metano de un biodigestor y la capacidad biodegradativa de los sustratos. El uso de inóculos adecuados, las mejores condiciones ambientales y la apropiada concentración del sustrato de los biorreactores ayudan al incremento de PBM (Angelidaki, Karakasshev, Batstone, Plugge, & Stams, 2011).

- **Tiempo de retención y velocidad de carga orgánica**

El tiempo de retención hidráulico (TRH) debe ser apto para asegurar el crecimiento bacteriano. Un aumento de TRH, implica un aumento en la cantidad de MO degradada por tanto representa un aumento en la cantidad de metano producido (Villanueva, Nájera, Gómez, Hernández, & Velasco, 2011). En la tabla 2 se muestran los TRH más utilizados según el tipo de estiércol.

Tabla 2.

Valores de tiempo de retención hidráulica en diferentes materias prima

Materia prima	THR
Estiércol vacuno líquido	20-30 días
Estiércol porcino líquido	15-25 días
Estiércol aviar líquido	20-40 días

Fuente: (Hilbert, 2003).

- **Relación carbon-nitrógeno (C/N)**

Expresa los niveles de nutrientes de un sustrato de la digestión. Esta relación está en valores entre 20:1-35:1, aunque generalmente el valor 25:1 es la más utilizada (Yen & Brune, 2007). Los valores muy altos aumenta la velocidad de degradación del nitrógeno, lo cual genera menor producción de metano; Por otra parte si la relación C/N es muy baja produce inhibición del amoníaco e intoxica a bacterias metanogénicas lo cual hace de la producción de biogás un proceso deficiente (Mao, Feng, Wang, & Ren, 2015).

- **Sólidos totales (ST)**

El porcentaje de sólidos totales contenido en la mezcla del biodigestor debe ser relativamente bajos, entre el 8-12% en digestores semicontinuos; y entre el 40-60% en digestores discontinuos. Un porcentaje muy alto de sólidos totales representa una limitación en el crecimiento de bacterias metanogénicas, por lo cual el biogás generado es poco eficiente (Ministerio de energía de Chile, FAO, PNUD, 2011).

4.2.2. Biogás. El biogás es un biocombustible generado a partir de la degradación anaeróbica de MO presente en residuos agroindustriales como lo son la ganadería y agricultura (Mshandete, Bjoinsson, Kivaisi, & y otros, 2006). El uso térmico del biogás para iluminación, calefacción y cocción de alimentos lo ha convertido en una fuente de energía alternativa sustentable de las comunidades que viven en zonas rurales, países como Alemania y España han utilizado este biocarburante para la producción de energía eléctrica mediante el uso de un motor; la combustión del CH_4 presente este biogás representa disminución de GEI, ya que el CO_2 liberado es originario de carbono biosférico (Villanueva et al., 2011). A continuación en la tabla 3 se muestran las proporciones de los gases presentes en el biogás.

Tabla 3.
Composición química del biogás.

Composición del Biogás	
Metano (CH_4)	50 - 75%
Dióxido de carbono (CO_2)	25 - 45%
Vapor de agua (H_2O)	1 - 2%
Nitrógeno (N_2)	1 - 5%
Otros (H_2 , CO , H_2S y O_2)	$\leq 1\%$

Fuente: (Lobato, 2012).

4.2.3. Tipos de reactores anaerobios. Los reactores químicos son recipientes utilizados para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia, con la finalidad de tratar efluentes domésticos o industriales con alta carga de materia orgánica. Con el fin de llevar a cabo el presente estudio, fue necesario el uso de reactores discontinuos o tipo *Batch*, los cuales se explican a continuación:

4.2.3.1. *Reactores discontinuos o tipo Batch (RB)*. Este tipo de reactores no permite el intercambio de materia con el exterior (masa constante), ya que están cerrados herméticamente para llevar a cabo el proceso anaeróbico; otra característica propia de este sistema es que el contenido del reactor es desechado tan pronto se efectúa la reacción. La operación de este reactor es en estado no estacionario (las concentraciones son dependientes del tiempo), debido a que las bacterias anaeróbicas presentes en el reactor, van a aumentar o a declinar su desarrollo dependiendo del tiempo en el cual se lleva a cabo la reacción (Grau, 1999).

Los reactores tipo batch son comúnmente utilizados en procesos que requieren obtener el comportamiento de variables respecto al tiempo (cinética de reacción), debido a la facilidad de interpretación de los datos obtenidos.

5. Metodología

Para llevar a cabo el presente proyecto de investigación fue necesario analizar, cuantificar y caracterizar cada uno de los parámetros establecidos en la siguiente metodología. Los materiales y reactivos utilizados en el diseño metodológico se presentan en los apéndices A y B.

5.1. Procedimiento experimental

El esquema de la metodología empleada para determinar el potencial de producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de estiércol ovino, caprino y bovino, se muestra en la figura 2.

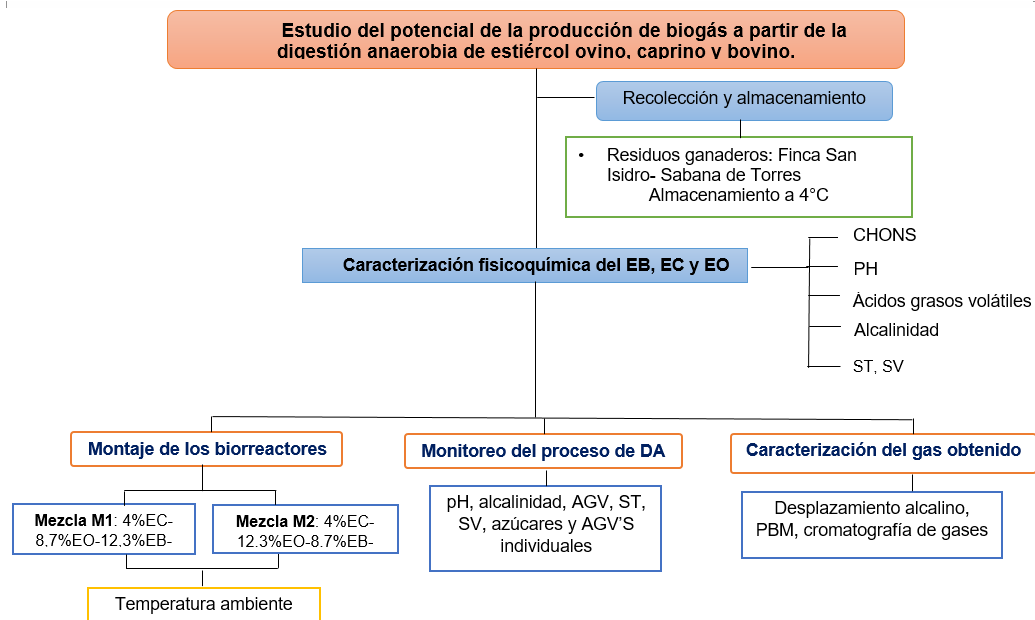


Figura 2. Esquema del diseño metodológico.

5.1.1. Recolección y almacenamiento de las materias primas. Los residuos ganaderos utilizados en este estudio estiércol bovino (EB), caprino (EC) y ovino (EO), fueron recolectados de la Finca el San Isidro (Sabana de Torres, Santander). Las muestras fueron almacenadas en una nevera a temperatura ente 4-6°C.

5.1.2. Diseño de birreactores. Los reactores tipo Batch se realizaron en botellas de ámbar de 100mL, para garantizar su condición anaerobia, estas fueron selladas herméticamente tal como se observa en la figura 3. Se trabajó con 30mL de muestra. Para el estiércol bovino (EB) se realizó una disolución (1:3) en agua, tal y como lo establece (Cendales, 2011); para el estiércol caprino

(EC) y el estiércol ovino (EO) se realizó la proporción (1:4), debido a que en su composición presentaba mayor cantidad de materia sólida (todos los reactores se trabajaron a temperatura ambiente). De acuerdo a las proporciones establecidas por (Cestonaro et al., 2015), se determinaron las siguientes mezclas de estudio (expresadas en peso/Volumen):

Mezcla 1: 4%EC- 8,7%EO- 12,3% EB- 75% agua

Mezcla 2: 4%EC- 12,3% EO- 8,7%EB- 75% agua

El proceso de digestión anaerobio de las mezclas mencionadas anteriormente, se llevó a cabo durante un periodo de 45 días y para las materias primas (EO, EC y EB) se llevó a cabo durante 23 días.



Figura 3. Diseño del biorreactor.

5.1.3. Caracterización de parámetros fisicoquímicos. Con el fin de evaluar las propiedades fisicoquímicas de las materias primas y establecer las condiciones óptimas necesarias para la producción de biogás, se realizó la caracterización del EB, EC y EO como se sigue a continuación. Así mismo, se realizó el seguimiento semanal de parámetros fisicoquímicos (pH,

AGV, alcalinidad total, ST y SV) a los reactores de cada una de las mezclas (M1 y M2), con el propósito de controlar el proceso anaerobio.

5.1.3.1. *Determinación de nutrientes-CHONS.* Estos parámetros se realizaron por servicios externos en laboratorios Calderón. Las muestras fueron trabajadas en base seca a 70 °C, mediante una técnica gravimétrica.

Con el fin de determinar el carbono total se realizó un análisis utilizando el método de Walkey y Black (NTC 5167), para analizar el nitrógeno presente en las muestras se utilizó el método de destilación propuesto por Kjeldahl (LBC 7); en lo que respecta con el análisis del azufre, se utilizó la técnica de turbidimetría según las normas técnicas colombianas 1174. Finalmente, el oxígeno e hidrógeno presente en las muestras fue determinado mediante un análisis bromatológico.

Con el fin de determinar la proporción de carbono y nitrógeno presente en cada inóculo y con ello medir su biomasa (materia orgánica), se determinó la relación C/N de las muestras mediante la siguiente ecuación. (Ministerio de energía de Chile, FAO, PNUD, 2011). La ecuación (1) fue utilizada para calcular la relación C/N presente en las materias primas.

$$C/N = \frac{C * Q}{N * Q} \quad (1)$$

Dónde: C/N= relación carbono/nitrógeno; C= % de carbono orgánico contenido en cada materia prima; N= % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima; Q= Peso fresco de cada materia prima.

Para determinar la relación C/N en las mezclas, fue necesario el uso de la ecuación (2), la cual se presenta a continuación.

$$C/N = \frac{C_{EB} * Q_{EB} + C_{EO} * Q_{EO} + C_{EC} * Q_{EC}}{N_{EB} * Q_{EB} + N_{EO} * Q_{EO} + N_{EC} * Q_{EC}} \quad (2)$$

5.1.3.2. *pH*. Se tomó 10mL de muestra en un tubo de ensayo, seguidamente se lleva a la centrifugadora Thermo Scientific a 4000rpm durante 50 minutos con el fin de realizar un procesos de lixiviación del sustrato. Finalmente se midió el pH a este sobrenadante, mediante el uso de tiras indicadoras. Este proceso se realizó por duplicado.

5.1.3.3. *Alcalinidad (AT) y ácidos grasos volátiles (AGV's)*. Se tomaron 5g de muestra en un vaso precipitado y se le adicionaron 25mL agua destilada con el fin de diluirla, seguidamente se tomó 10mL de esta solución y se pasó por la centrifuga; se tituló 5 mL del sobrenadante con ácido clorhídrico (HCl) al 0,1N hasta pH de 4,5 para finalmente anotar la cantidad de ácido usado (A).

La mezcla resultante se vertió en un balón fondo redondo adaptado a un condensador tipo rosario y se dejó en reflujo durante 2 minutos, inmediatamente se llevó a un baño de hielo hasta alcanzar temperatura ambiente. El producto obtenido y reposado se transfirió a un vaso precipitado para finalmente ser titulado con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0,1N hasta un pH de 6,5. Se anotó el volumen gastado de la anterior solución (B). (Anderson & Yang, 1992)

Para calcular la cantidad de AGV y alcalinidad total, fue necesario el uso de las siguientes ecuaciones (3) y (4):

$$AT (mgCaCO_3) = \frac{A * N_{HCl}}{Vol. muestra} * 50000 \quad (3)$$

$$AGV \left(mg \text{ Ac.} \frac{\text{Acético}}{L} \right) = \frac{B * N \text{ NaOH}}{\text{Vol. muestra}} * 60000 \quad (4)$$

5.1.3.4. *Sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV).* Se pesaron los crisoles vacíos (peso A) y se adicionó 5g de la muestra, se anotó el peso de la capsula con la muestra como peso B, posteriormente se llevaron los crisoles a una mufla de calentamiento durante 24 horas a 105°C; una vez cumplido este proceso de secado, las capsulas fueron trasladadas al desecador hasta que alcanzaron la temperatura ambiente, seguidamente fueron pesadas (peso C).

Posteriormente las muestras fueron sometidas a un proceso de calcinación en la mufla durante 1 hora a 550°C, una vez terminado este proceso se traspasaron al desecador hasta que alcanzaron la temperatura ambiente. Finalmente fueron pesadas y su valor fue anotado como peso D (American Public Health Association, 2009).

En las ecuaciones (5) y (6) se observa el cálculo para la determinación de sólidos totales y sólidos volátiles.

(5)

$$ST(g/Kg) = \frac{(C-A)*1000}{B-A}$$

(6)

$$SV(g/Kg) = \frac{(C-D)*1000}{B-A}$$

5.1.4. **Azúcares y AGV's individuales.** Se tomaron 10mL de las muestras de los reactores, se pasaron por la centrifuga a 4000 rpm durante 30 minutos. se mezcló 300µL del sobrenadante con 700µL de la solución acidulada y se filtró en un filtro de 0,22µm; finalmente la solución anterior se almacenó en viales y se realizó el respectivo análisis por cromatografía líquida

de alta eficiencia (HPLC). Las condiciones que se trabajó el equipo de HPLC Agilent Technologies 1200 series, se muestran en la tabla 4.

Tabla 4.

Condiciones de operación en que se llevó a cabo la técnica de HPLC.

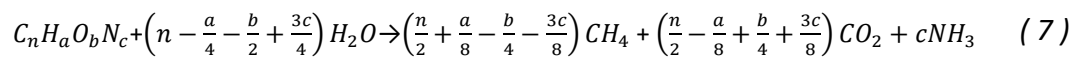
Tipo de columna	Columna Aminex hpx-87h
Fase móvil	Solución 0,005M de H_2SO_4
Flujo	0,6 mL/min
Volumen inyección	10 μ L , relación 3:7 (muestra: fase móvil)
Temperatura	50°C
Detector DAD1	Cuantificación de ART
Detector R1D1	Cuantificación de AGV's
Tiempo de separación	35 minutos

5.1.5. Medición de la cantidad de biogás producido. Para evaluar la cantidad de biogás obtenido diariamente en los reactores, fue necesario realizar un montaje por medio del método de desplazamiento alcalino, en donde cada reactor estaba comunicado por medio de mangueras de microgoteo y agujas a la botella de desplazamiento líquido. El biogás que se produjo en los reactores fue absorbido por una solución alcalina ($NaOH$ 0,05N) y con fenolftaleína (indicador), el volumen de gas metano generó un desplazamiento volumétrico igual de la solución alcalina. Finalmente, el volumen de solución alcalina desplazada fuera de la botella es equivalente al volumen de biogás producido en cada reactor (Bezerra, r. A.; Rodriguez, j. A. D.; Ratusznei, s. M.; Zaiat, m.; Foresti, 2009). La figura 4 muestra el montaje utilizado para la medición de biogás mediante desplazamiento alcalino.



Figura 4. Montaje para la medición del biogás generado.

5.1.6. Determinación del potencial de biometanización (BPM). El potencial teórico de producción de biogás, está limitado por la estequiometría y puede calcularse mediante composición elemental de la materia prima, para ello se utilizó el modelo de Busweel y Neave, tal y como se muestra en la ecuación (7), (Toro, J.; Mariscal, J.; Aristizabal, B., 2017).



El potencial de biometanización teórico, está determinada por la Ecuación (7), haciendo uso de los coeficientes estequiométricos (n, a, b, c) ajustados para cada sustrato y para mezcla; asumiendo la conversión completa de toda la materia orgánica en biogás, se obtiene la ecuación (8), (Li et al., 2013).

$$PBM_{th} \left(\frac{mL CH_4}{gSV} \right) = \frac{22,4 \cdot 1000 + \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8} \right)}{(12n + a + 16b + 14c)} \quad (8)$$

Con el fin de determinar la viabilidad en el proceso de fermentación anaerobia de los inóculos y las mezclas utilizadas, se determinó el BPM experimental, parámetro encargado de medir la máxima producción semanal de metano en los reactores (Sánchez-Reyes et al., 2016). Para la determinación del BPM se utilizaron las ecuaciones (9) y (10).

$$BPM_{exp} = \frac{mL \text{ de } CH_4}{g \text{ de } SV} \quad (9)$$

$$g \text{ de } SV = \frac{SV}{g \text{ de muestra}} \quad (10)$$

5.1.7. Caracterización del biogás.

La caracterización del biogás generado en las mezclas 1 y 2 se realizó utilizando la técnica de cromatografía de gases por servicios externos en el Centro de Cromatografía y Espectroscopia de Masas (CROM-MASS), ubicado en la Universidad Industrial de Santander (UIS).

6. Análisis y resultados

6.1. Caracterización fisicoquímica de los inóculos utilizados (EO, EC y EB).

En la tabla 5 se pueden observar los resultados de la caracterización fisicoquímica de los inóculos ovino, caprino y bovino. De acuerdo a los porcentajes de carbono y nitrógeno obtenidos que se observan en la tabla 5, se calculó la relación C/N para cada uno de los inóculos utilizados durante el presente estudio.

Tabla 5.

Caracterización Fisicoquímica de los inóculos ovino, caprino y bovino.

Parámetro iniciales	Valor EB	Valor EC	Valor EO
pH	7	8,7	7,5
Alcalinidad (mg de CaCO ₃ /L)	1513,3	3466,7	1540,3
Ácidos grasos volátiles (mg de A. Acético/L)	1484,6	3380,2	1796,4
Sólidos totales (g/kg)	22,04	134,3	152,9
Sólidos volátiles (g/kg)	19,20	109,1	125,6
Carbono (%P/P)	30,49	31,8	31,36
Hidrógeno (%P/P)	5,06	5,3	4,51
Oxígeno (%P/P)	40,65	42,4	36,8
Nitrógeno (%P/P)	1,74	1,25	1,87
Azufre (%P/P)	0,18	0,26	0,21

Según la tabla 5, el valor reportado para pH en la caracterización de las muestras EB y EO se encuentran entre 6,5-7,5 rango de pH con mayor viabilidad para que se dé la DA (Kondusamy & Kalamdhad, 2014). Con respecto al valor de pH obtenido de EC (8,7), podemos afirmar que se encuentran cercanos a lo mencionado por Lide & Alvarez (2008), es decir 8,9 respectivamente. Los valores de alcalinidad en las muestras cumplen con lo establecido por (Escalante, Guzman, & Castro, 2014), ya que se encuentran en el rango óptimo entre 1500 y 7500 mg CaCO₃/L.

Los inóculos EC (109,1)y EO (125,6) presentan mayor cantidad de SV en comparación del EB (19,20), lo cual representan materias primas con gran contenido de materia orgánica asimilable en el proceso digestivo anaeróbico (Flotats, Bonmati, Fernandez, & Sales, 2016). En el caso de las concentraciones de azufre, las muestras presentaron valores inferiores a 0,5 %p/p; probablemente pudo contribuir en minimizar la generación de bacterias sulfatoreductoras, responsables de inhibir la producción de biogás, lo cual favorecería el proceso digestivo (Cendales, 2011).

Teniendo en cuenta el contenido de carbono y nitrógeno en las muestras de interés en este estudio que se observa en la tabla 5, se determinaron las relaciones C:N la cuales se pueden observar en la tabla 6.

Tabla 6.

Relación C/N de los inóculos y mezclas utilizadas.

Parámetro	Inóculo			Mezcla	
	EO	EC	EB	1	2
C/N	17:1	25:1	18:1	21:1	22:1

Según la tabla 6, los valores experimentales de la relación C/N del estiércol ovino, estiércol caprino, estiércol bovino y las mezclas utilizadas se establecen dentro del rango adecuado de los 15:1-30:1 para la producción de biogás, según lo establecido por (Risberg, Sun, Leven, & Schnurer, 2013). En el caso del EC el cual presenta una relación C/N con un valor de 25:1, muestra que podría presentar una mayor multiplicidad y desarrollo de bacterias metanogénicas, pues presenta una relación C/N adecuada, según la literatura (Ministerio de energía de Chile, FAO, PNUD, 2011).

6.2. Monitoreo de la digestión anaerobia

Con el fin de realizar un seguimiento al proceso de digestión anaerobia, se realizó la cuantificación de los parámetros fisicoquímicos como pH, AGV, alcalinidad, ST, SV, azúcares y ácidos grasos volátiles individuales; estos parámetros brindan información sobre la degradación de la materia orgánica presente en el sistema y de cada una de las etapas que se generan durante la DA.

6.2.1. Monitoreo del potencial de hidrógeno (pH). Con el fin de observar el comportamiento del pH durante el proceso anaerobio, se realizó un seguimiento semanal para cada reactor como se muestra a continuación en la figura 5 y 6.

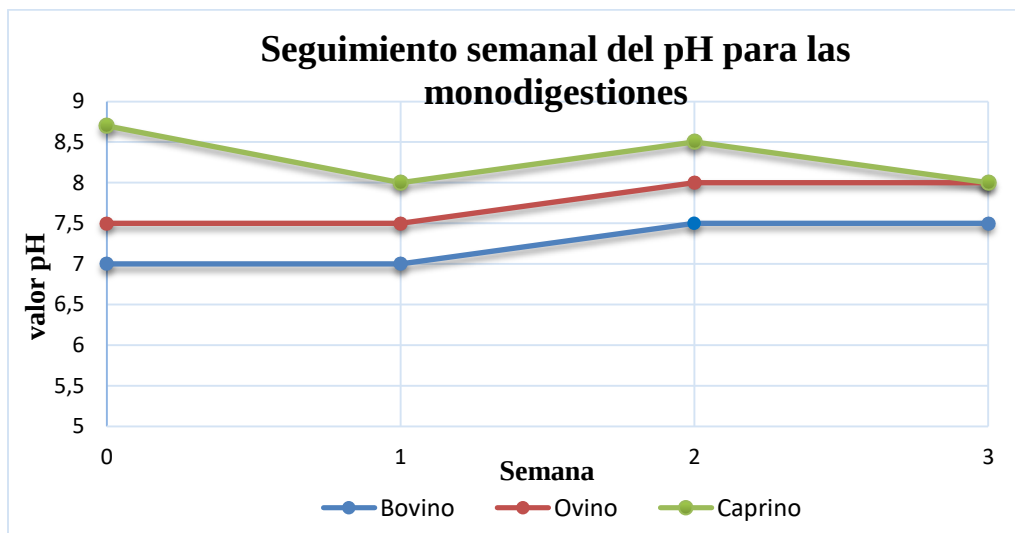


Figura 5. Seguimiento de pH en las monodigestiones, durante las tres semanas del proceso.

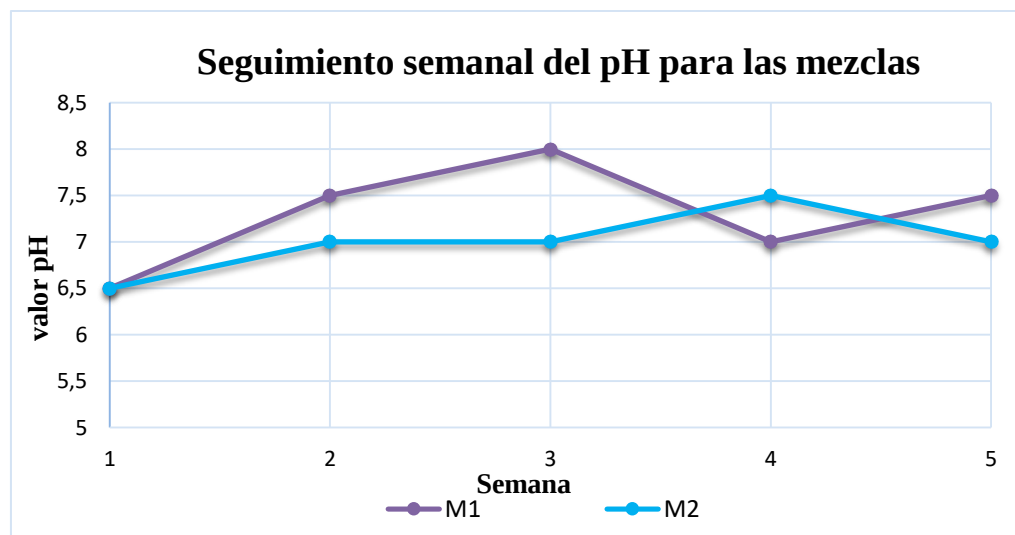


Figura 6. Seguimiento de pH en las mezclas establecidas, durante las cinco semanas del proceso.

Según la figura 5 y 6, los resultados presentan valores entre 7-8 para todos los 5 sistemas (EC, EO EB, M1 y M2) durante todo el proceso, sin embargo, los reactores de las mezclas mostraron al

inicio del proceso el mínimo valor de pH (6,5), debido a que se encontraba en transcurso de su estabilización; a partir de la segunda semana del proceso, las mezclas mantienen valores de pH en el rango anteriormente mencionado hasta el final del proceso.

Cabe resaltar que los valores obtenidos de pH en los reactores de estudio presentaron óptimas condiciones de operación según lo establecido por (Florez, 1982) (Pavlostathis, 1991), pues se establecieron entre 7-8, rango de pH con mayor viabilidad para que se dé la DA, ya que se mejora la solubilidad del sustrato y genera mayor efectividad y rapidez en la fase de hidrolítica. Los valores obtenidos de pH corroboran que ninguno de los reactores presentó acidificación, lo cual favorece el proceso de digestión anaerobia.

6.2.2. Sólidos totales (ST) y Sólidos volátiles (SV). Con el fin de controlar el proceso de digestión anaerobia, se monitoreó semanalmente las concentraciones de ST y SV presentes en las mezclas, tal y como se puede observar en la tabla 7.

Tabla 7.

Cantidad de ST y SV para la mezclas M1 (EO 12,3%-EB 8,7%-EC 4%) y M2 (EO 8,7%-EB 12,3%-EC 4%).

Reactor	Semana	Sólidos Totales [g/kg]	Sólidos Volátiles [g/kg]
M1	1	182,2	146,6
	2	160,2	128,2
	3	137,6	115,2
	4	147,0	117,6
	5	120,4	101,3
M2	1	138,3	124,2
	2	126,8	111,0
	3	119,6	103,3
	4	130,6	115,2
	5	114,1	91,5

A partir de la tabla 7 se puede inferir el comportamiento de la materia orgánica fácilmente soluble (en términos de sólidos volátiles) presente en los reactores de M1 y M2. De acuerdo a los SV determinados para M1 y M2 se observa una tendencia a disminuir la cantidad de materia orgánica hasta finalizar el proceso, este comportamiento es característico en la DA. Otro aspecto a destacar es que la mixtura de los 3 inóculos, a partir de la primera semana de la DA presentaron un aumento del 14% y 83% en la cantidad de MO, en comparación con el valor inicial de MO del estiércol EO y EB (ver tabla 5). Este aumento en la cantidad de SV puede llegar a disminuir el PBM en este tipo de mezclas.

6.2.3. Ácidos grasos volátiles y Alcalinidad total. A partir de los datos obtenidos de AGV y AT para cada tipo de reactor (ver apéndice C), se estableció la relación AGV/AT con el fin de determinar la estabilidad del proceso, tal y como se puede observar en las figuras 7 y 8.

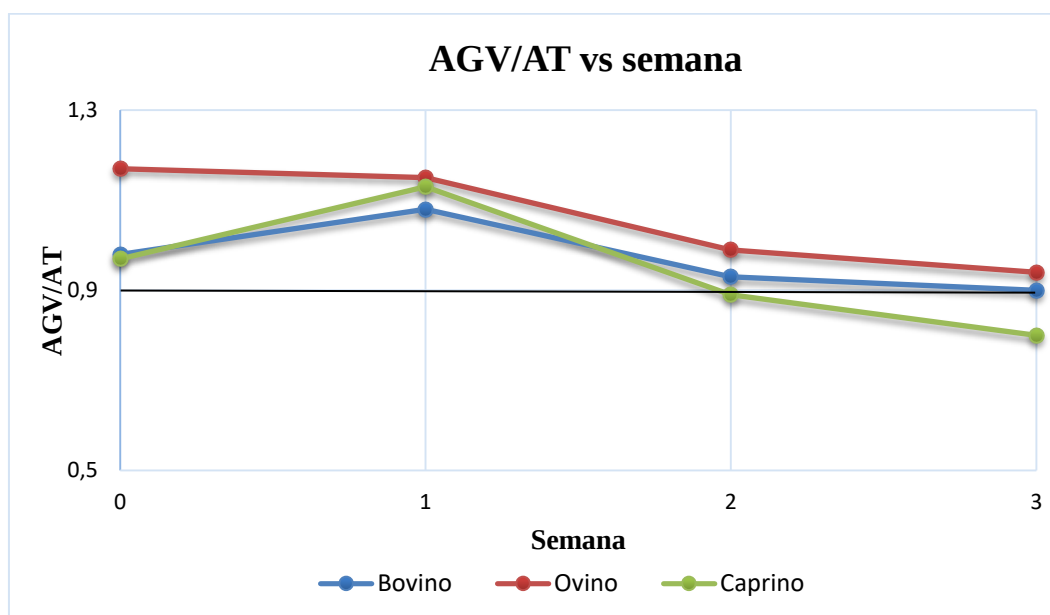


Figura 7. Relación AGV/AT para cada una de las monodigestiones.

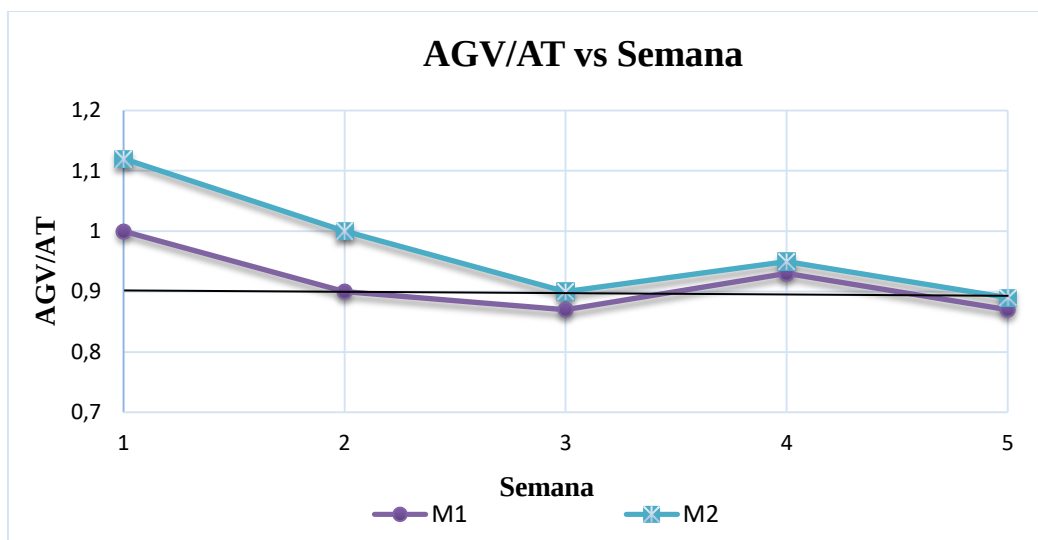


Figura 8. Relación AGV/AT de las mezclas establecidas.

El seguimiento realizado a los reactores durante la digestión anaerobia (figura 7 y 8), muestra que la concentración de AGV inicial (semana 1) en cada reactor fue mayor respecto a la concentración alcalina. A partir de la tercera semana del proceso, los reactores se ven favorecidos por el incremento en la concentración alcalina, lo cual favorece al proceso ya que mantiene el pH neutro, evitando la acidificación del medio.

De acuerdo a (Schoen et al., 2009), el parámetro AGV/AT indica una inestabilidad en el proceso cuando toma valores superiores a 0,9. En la figura 7 y 8 también se puede apreciar que todos los reactores presentaron inestabilidad durante las 2 primeras semanas del proceso; lo anterior podría indicar que durante la fase inicial del proceso fermentativo anaerobio, no hubo un balance estable entre la población de microorganismos acidogénicos y metanogénicos, debido a que la producción de ácidos grasos volátiles en el sistema eran mayores a las de consumo de los mismos; sin embargo, a partir semana 3 se observa que la relación AGV/AT de M1 y M2 es cercana o inferior a 0,9, lo cual puede indicar que en esta semana los sistemas en ambos reactores presentaron mejoría en la

estabilidad debido al aumento de la capacidad buffer en el sistema (Rivera, 2010; Wan, Zhou, Fu, & Li, 2011).

6.2.4. Determinación de Ácidos grasos individuales. Con el fin de evaluar los AGV's individuales presentes en las mezclas, se realizó un procedimiento a partir de la técnica HPLC, en el cual se identificaron los tiempo de retención como muestra la tabla 8, además se realizó la respectiva curva de calibración de los AGV's utilizando concentraciones entre 0,05-1 mg/ml (ver figuras 9 y 10).

Tabla 8.

Tiempos de retención para cada AGV analizado

AGV's	Tiempo de retención (minutos)
Ácido acético	14,9
Ácido propiónico	17,6
Ácido butírico	21,5
Ácido Isobutírico	19,8

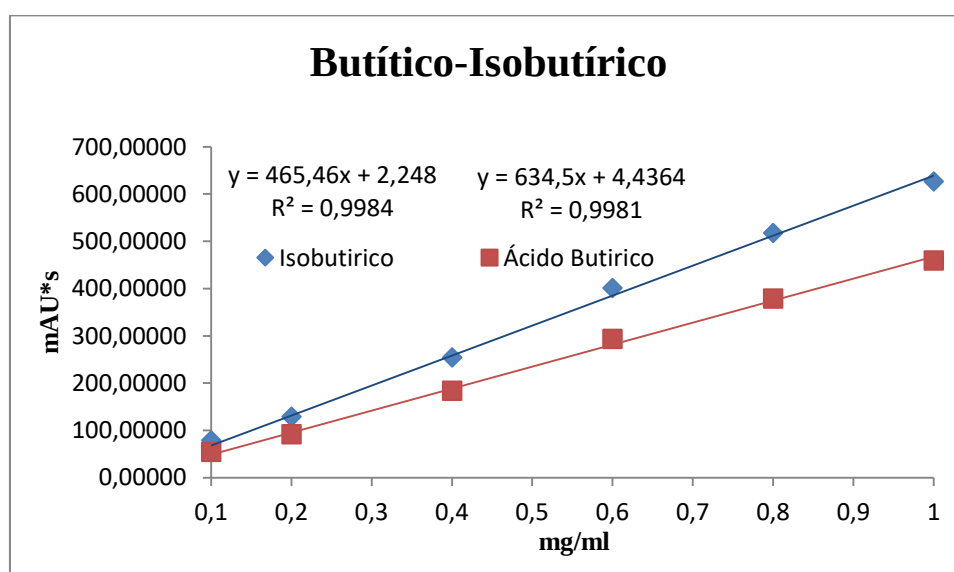


Figura 9. Curva de calibración para cuantificación del Ácido Butírico e Isobutírico

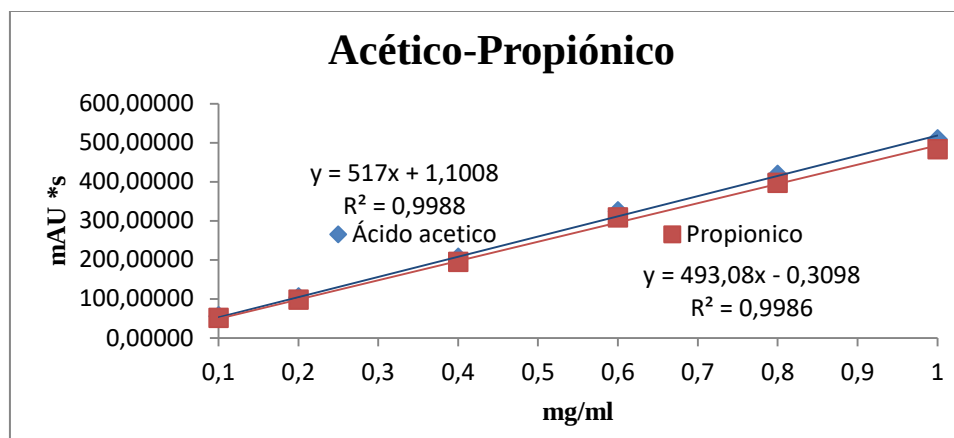


Figura 10. Curva de calibración para cuantificación del Ácido Acético y Propiónico

A partir de la figura 9 y 10, se realizó la cuantificación de las concentraciones de los metabolitos anteriormente mencionados (Ácido isobutírico, ácido butírico, ácido acético y ácido propiónico) presentes en M1 y M2 respectivamente, tal como se muestra en la figura 11.

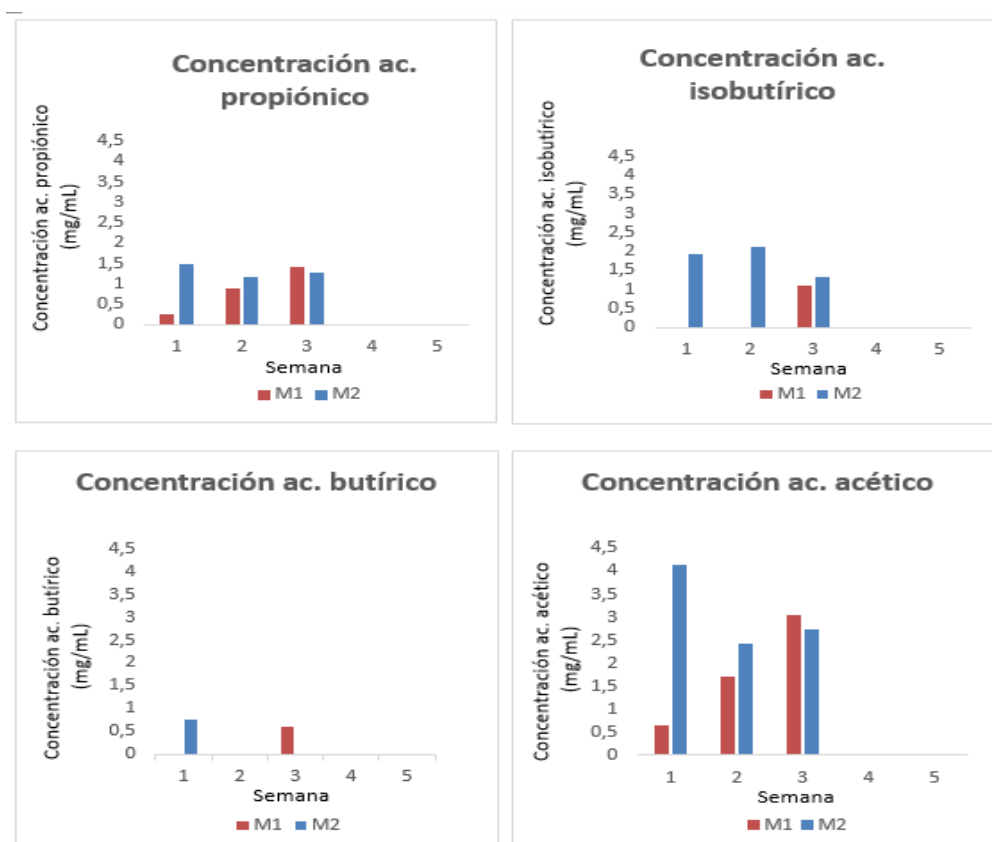


Figura 11. Cuantificación de AGV's para M1 y M2

En los resultados de la figura 11 se observa que hubo presencia de los 4 metabolitos anteriormente mencionados en los reactores de M1 y M2, además la mezcla que presentó mayores concentraciones de los metabolitos en estudio fue la M2. Una tendencia que se puede observar es que con el transcurso de las semanas los valores de las concentraciones del ácido acético y ácido propiónico en M1 tienden a aumentar y en la M2 tienden a reducirse hasta la tercera semana del proceso, esto se relaciona con transcurso de la etapa acidogénica; además debido a que en la M2 presenta mayor consumo de los AGV's, esta se ve más favorecida en la producción de acetato y posteriormente podría favorecer la generación de biogás comparado con la M1. Otro aspecto a tener en cuenta es la relación ácido acético: ácido propiónico, tanto para M1 y M2 se encuentran entre 0,9 y 4mg/mL, lo cual nos indica que posiblemente durante la fase metanogénica del proceso de digestión anaerobia no presentó mayores pérdidas energéticas en estos reactores (Carmona, Bolívar, & Giraldo, 2009).

Las concentraciones obtenidas de los AGV's individuales expuestos en la figura 11, muestra que durante las primeras dos semanas la M2 presentó mayores concentraciones de ácido acético, butírico, isobutírico y propiónico, en comparación con la M1; en la tercer semana del proceso las concentraciones de los AGV son similares para las dos mezclas y finalmente en la cuarta semana hay degradación total de los ácidos grasos volátiles; lo anterior se relaciona de manera similar con el comportamiento que tienen las mezclas en la producción AGV durante el transcurso de las 5 semanas del proceso (ver apéndice C).

6.2.5. Determinación de azúcares. Con el fin de establecer los tiempos de retención (TR) de los azúcares glucosa, arabinosa, xilosa y celobiosa, fue necesario realizar un patrón el cual contenía cada uno de estos sacáridos como se puede apreciar a continuación en la figura 12.

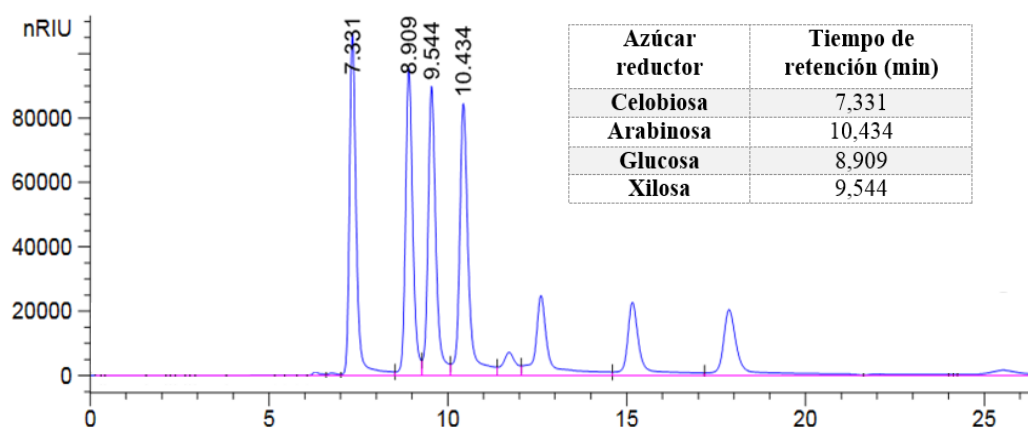


Figura 12. Patrón utilizado para la cuantificación de arabinosa, celobiosa, glucosa y xilosa.

Como se puede observar en la figura 12, se presentan 4 picos característicos de los azúcares reductores evaluados en este proyecto; los tiempos de retención en su respectivo orden de acuerdo al cromatograma son celobiosa (7,331 minutos), glucosa (8,909 minutos), xilosa (9,544 minutos) y arabinosa (10,434 minutos). Una vez identificado los tiempos de retención, se procedió a realizar la curva de calibración utilizando concentraciones entre 0,01-0,1 mg/ml de cada sacárido. Las curvas de calibración para los azúcares glucosas, xilosa, arabinosa y celobiosa se pueden apreciar en las figuras 13,14, 15 y 16 respectivamente.

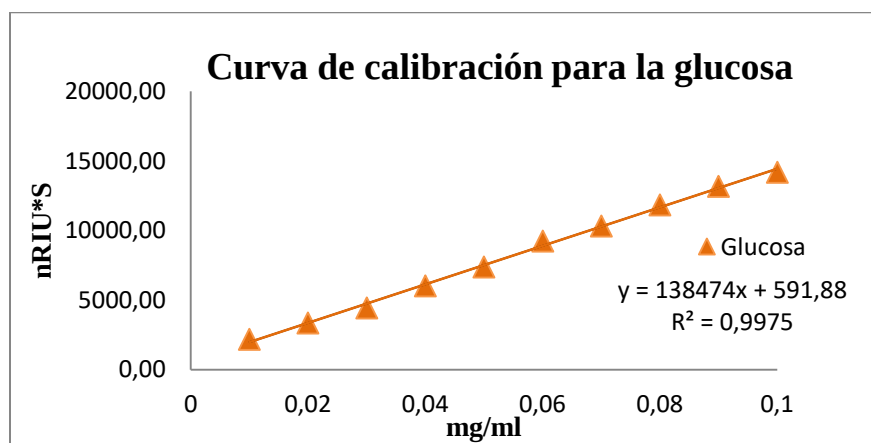


Figura 13. Curva de calibración para la determinación de Glucosa.

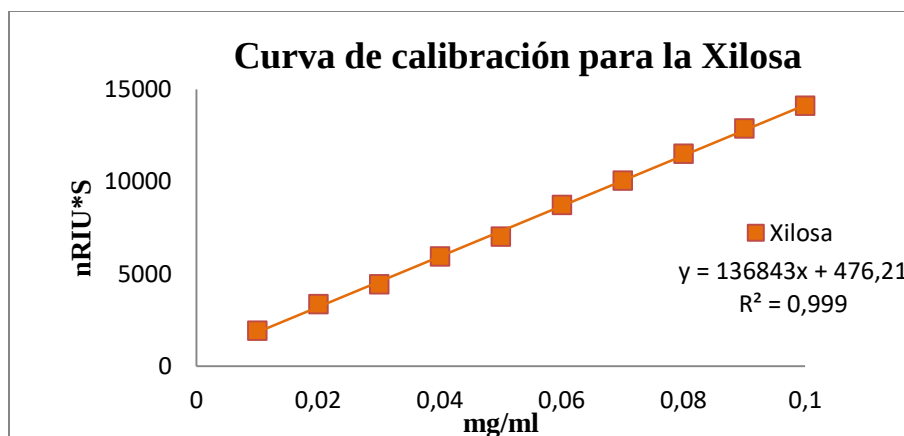


Figura 14. Curva de calibración para la determinación de Xilosa.

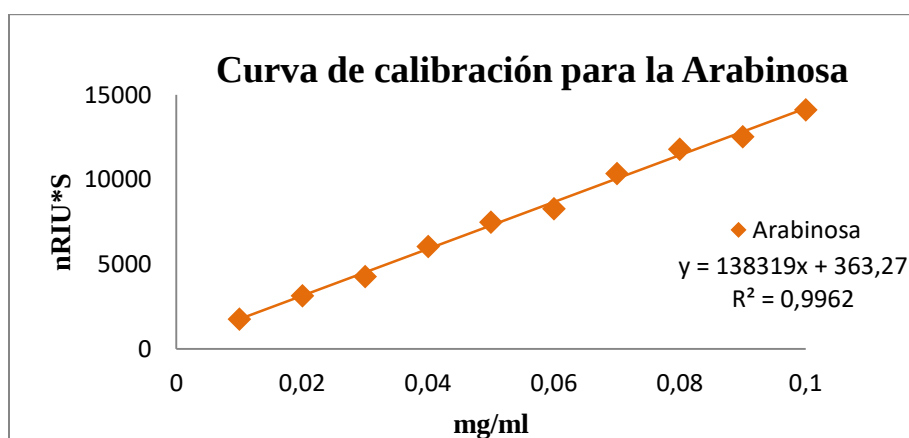


Figura 15. Curva de calibración para la determinación de Arabinosa.

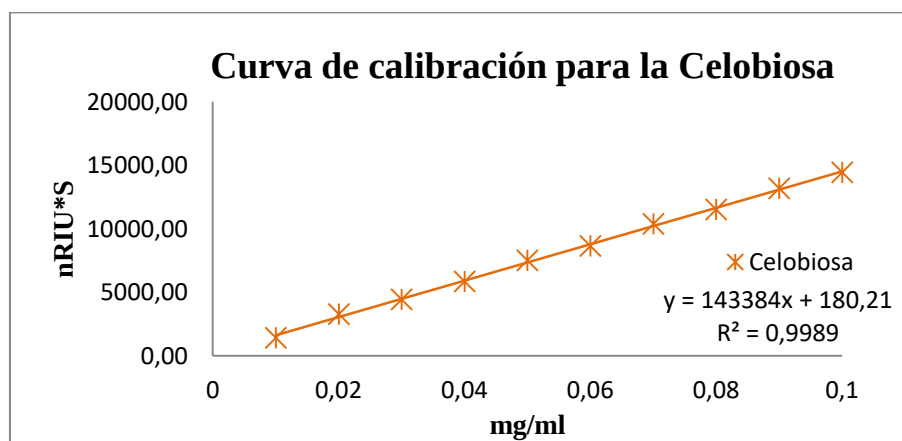


Figura 16. Curva de calibración para la determinación de Celobiosa.

A partir de la ecuación de la recta de calibrado de los azúcares anteriormente expuestos, se determinó la concentración de estos analitos en M1 y M2. Los azúcares presentes en las mezclas fueron arabinosa y glucosa, tal como se puede apreciar en la figura 17. Cabe resaltar que no hubo presencia de celobiosa ni xilosa, esto pudo deberse posiblemente a que estos sacáridos ya habían sido consumidos en la etapa hidrolítica del proceso o a que el factor de dilución utilizado en el análisis de HPLC de las muestras del biorreactor, no fue el adecuado para la determinación de estos analitos.

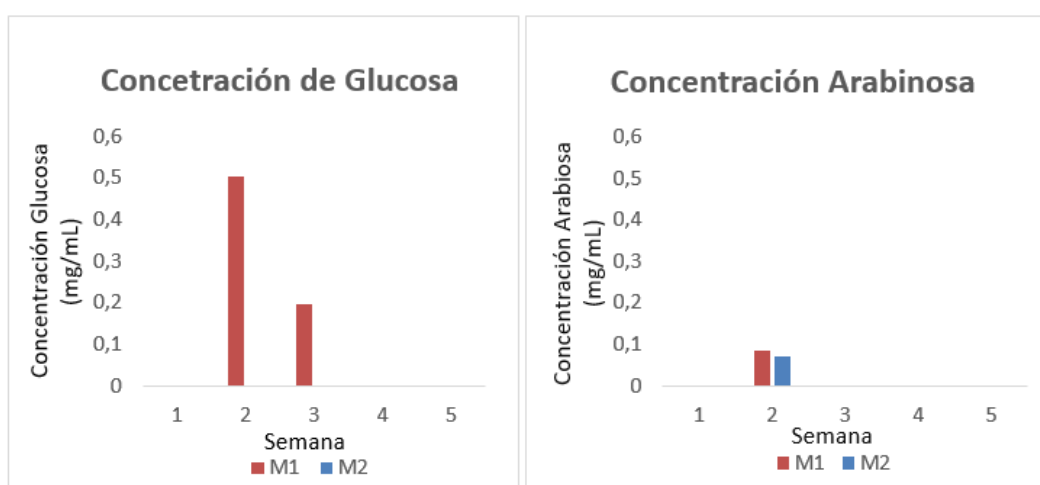


Figura 17. Cuantificación de glucosa y arabinosa para M1 y M2.

En la figura 17 observa el comportamiento de la cantidad de glucosa y arabinosa presente en las mezclas. En lo que respecta a M1, se determina la presencia de glucosa y arabinosa a partir de la segunda semana proceso, en la semana 3 hubo degradación total de arabinosa y la concentración de glucosa disminuyó, hasta finalmente ser degradada a partir de la cuarta semana del proceso.

El consumo de los azúcares reductores en M2 probablemente se llevó a cabo desde la primera semana del proceso, y como consecuencia no hay presencia de glucosa por lo que se supone que ya ha sido degradada para la formación de ácidos intermediarios, lo anterior implica que la etapa hidrolítica del proceso se llevó a cabo rápidamente (Escalante et al., 2014).

6.3. Desplazamiento alcalino

A partir de los datos obtenidos recopilados en las tablas que se muestran en los apéndices D y E, se grafica el volumen de producción de biogás por el método de desplazamiento alcalino para cada reactor anaerobio (EB, EO, EC, M1 y M2), tal como se puede observar en la figura 18 y 19.

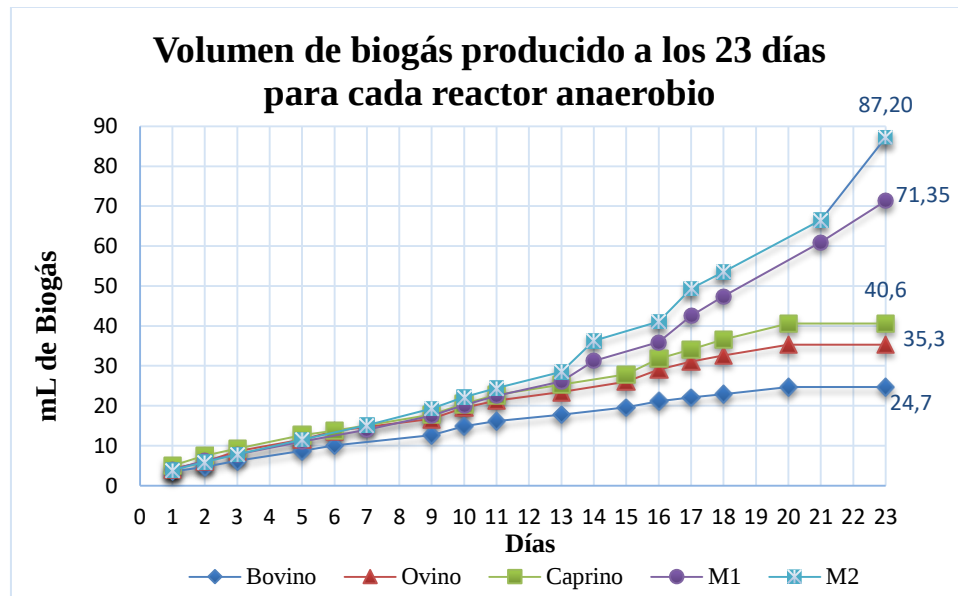


Figura 18. Gráfico de la cantidad de Biogás producido para cada uno de los reactores durante 23 días de estudio.

Según la figura 18, se observa un incremento de la producción de biogás al realizar el proceso de digestión anaerobia de la mezcla M1 (71,35mL) y M2 (87,20mL), en comparación con las mono-digestiones de cada una de las materias primas, estiércol bovino (24,7mL), estiércol ovino (35,3mL) y estiércol caprino (40,6mL), por lo que se hace evidente la eficiencia de las mezclas trabajadas. Además, se evidencia, que durante los 23 días de medición, el proceso con estiércol caprino presentó el mayor volumen de biogás acumulado, seguido del estiércol ovino y en menor proporción, el estiércol bovino; para las monodigestiones después del tiempo de análisis (23 días) los sistemas mencionados anteriormente, tienden a tener un comportamiento constante que puede

finalizar en la reducción de la producción de biogás, mientras que, las mezclas M1 y M2, muestran una tendencia creciente tal y como se puede observar en la figura 19.

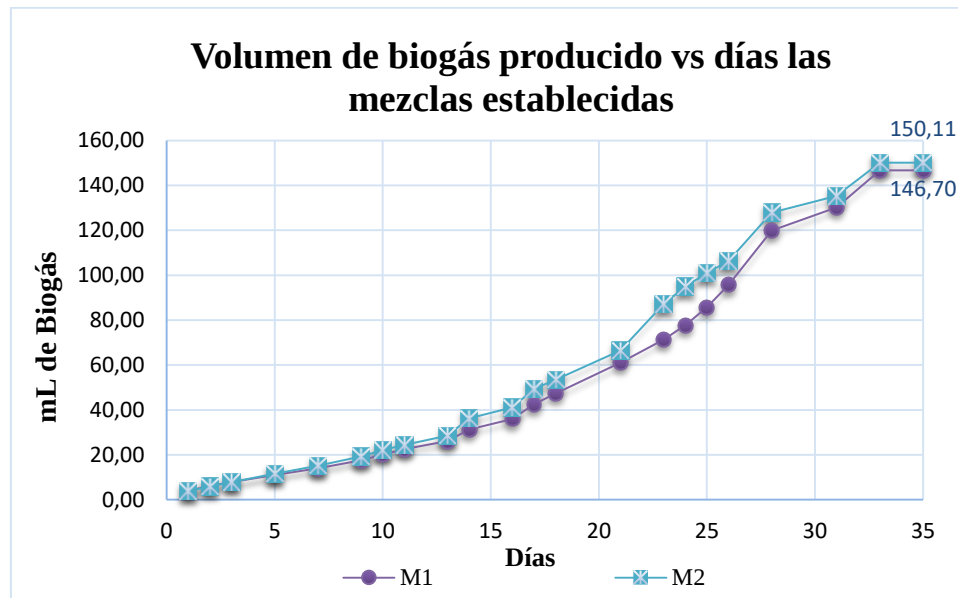


Figura 19. Cantidad de Biogás producido para M1 y M2 durante el periodo de estudio.

Mediante la figura 19 se muestra que M2 presentó mayor producción de biogás en un periodo de 35 días de estudio con 150,11mL, respecto a M1 con una producción de 146,7mL. Ahora bien, a partir del día 33 del proceso, se evidencia que inicia un comportamiento constante en la cantidad acumulada de biogás para M1 y M2. Valores de producción de biogás similares a los obtenidos en la presente investigación son reportados por (Cestonaro et al., 2015), obteniendo volúmenes acumulados de biogás entre 200mL y 150mL para procesos de codigestión usado estiércol ovino y bovino durante la quinta semana del proceso.

6.4. Potencial de biometanización de las mezclas utilizadas

De acuerdo con el volumen acumulado de biogás y la cantidad de materia orgánica en términos de SV, se halló el potencial de biometanización (PBM) para los reactores M1 y M2 establecidas para un periodo de 5 semanas del proceso, tal y como se observa en la figura 20.

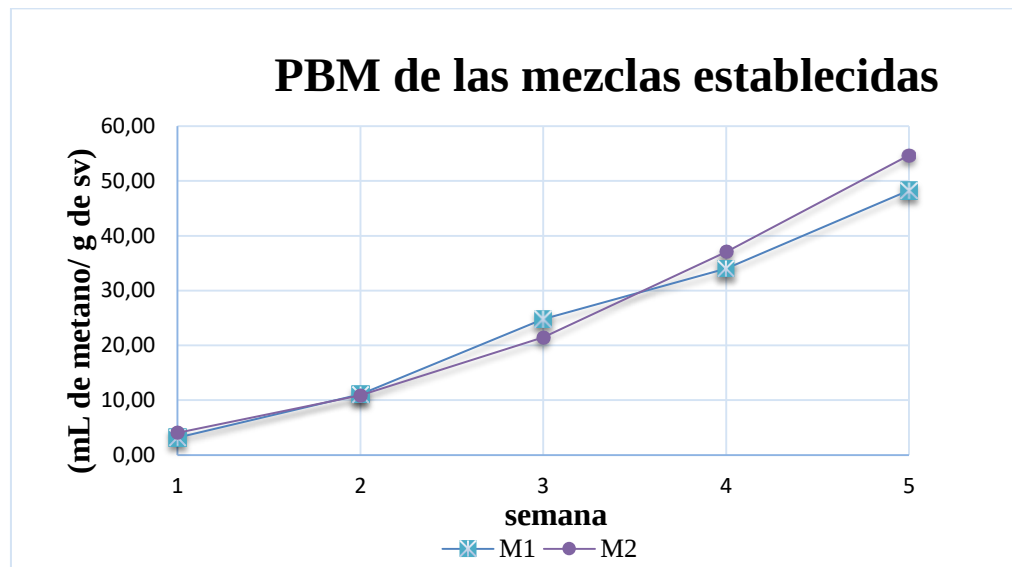


Figura 20. Relación de PBM (mL de biogás/ g de SV) de las mezclas 1 y 2 durante las 5 semanas de estudio.

Los resultados que se pueden apreciar en la figura 20 muestra que el comportamiento del potencial de biometanización para M1 y M2 fue muy similar durante las primeras cuatro semanas, ya que la variación semanal entre estos fue inferior a 4mL de metano/ g de SV; sin embargo, en la quinta semana, se evidencia un incremento del PBM para M2. Según lo reportado por (Julio, 2016) la mayor producción de biogás está enlazada con la relación C/N más alta, es decir, la mezcla M2, la cual poseía la mayor relación C/N (22:1), con un mayor potencial de biometanización de 54,68mL de metano/ g de SV en comparación con la mezcla M1, la cual presentó un potencial de biometanización de 48,27 mL de biogás/g SV en un periodo de 5 semanas; esto se debe probablemente a que por ser la mezcla con la menor proporción de estiércol ovino, presentó la

menor relación C/N (21:1), por lo tanto, el balance nutricional de esta mezcla era menos favorable en relación con la M2.

(Muñoz, 2015) establece valores entre los 55-60mL de metano/ g SV en la DA de inóculo vacuno durante la cuarta semana del proceso; los valores obtenidos experimentalmente en este estudio fueron inferiores, ya que durante este mismo periodo del proceso se obtuvo PBM de 34 y 37mL de metano/ g SV para M1 y M2 respectivamente. Los resultados experimentales obtenidos en esta investigación difieren de lo reportado por (Muñoz, 2015), debido a que el estiércol ovino y caprino presentes en los reactores de este estudio tienen una mayor concentración SV, en comparación el EB, objeto de estudio en la literatura referenciada. El aumento de SV en el EO y EC puede ser debido a que en su composición presenta grandes cantidades de material lignocelulósico, lo que dificulta degradación de la MO y por ende afecta el rendimiento de producción del biogás (Cestonaro et al., 2015).

Según la composición elemental para cada una de las materias primas utilizadas en el presente estudio (ver tabla 5), se determinó el potencial de biometanización teórico para M1 y M2, el cual fue de 365mL de metano/ g de SV y 368mL de metano/ g de SV respectivamente; los resultados experimentales arrojaron potenciales inferiores a lo teórico, mostrando una eficiencia del 13% y 15% para M1 y M2.

6.5. Caracterización del gas producido

La caracterización por cromatografía de gases se realizó a los reactores M1 y M2 a 10 días del proceso digestivo anaeróbico, tal y como se observa en la figura 21 y 22. Los valores de las concentraciones para cada uno de los gases presentes en M1 y M2 al décimo día del proceso de DA se pueden observar en el apéndice F.

Composición biogás M1

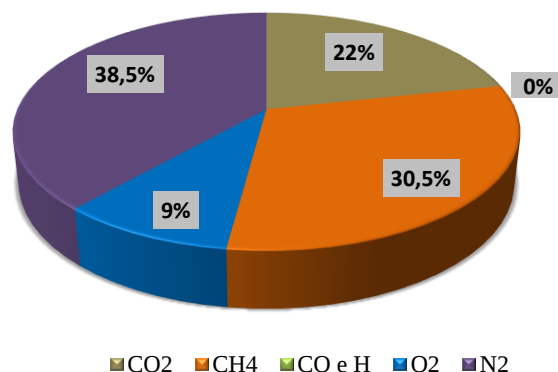


Figura 21. Composición del biogás de la M1 al décimo día del proceso

Composición biogás M2

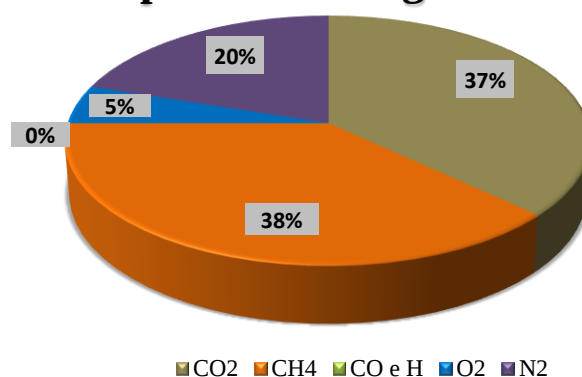


Figura 22. Composición del biogás de la M2 al décimo día del proceso

Se puede observar que en un periodo de 10 días la composición del biogás que muestran en las figuras 21 y 22 de las mezclas utilizadas en el presente estudio están compuestas por dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), oxígeno molecular (O_2), nitrógeno molecular (N_2) y pequeñas trazas de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno molecular (H_2); además se puede observar que ambas gráficas presentaron gran cantidad de N_2 y O_2 , este fenómeno pudo haberse presentado

debido a que hubo presencia de aire atmosférico en los reactores ya que no fueron purgados, lo cual probablemente generó la presencia de estos gases biogás. La composición del biogás en los reactores M1 y M2 muestra un porcentaje de CO_2 de 22% y 37% respectivamente, probablemente gran parte de la MO se encuentra en fase acetogénica, en la cual los AGV's y alcoholes son convertidos en acetato y CO_2 . Cabe aclarar que la toma de muestra del biogás para su respectiva caracterización, no fue realizada en el periodo de 5 semanas sino de tan solo 10 días (R. Parra, 2015).

7. Conclusiones y recomendaciones

- Mediante la caracterización de los parámetros fisicoquímicos para cada una de los residuos utilizados en el presente estudio (estiércol ovino, caprino y bovino), se puede determinar que son materias primas factibles para la producción de biogás, ya que se establecen en el rango reportado en la literatura.
- El proceso anaerobio de M1 y M2 presentó inestabilidad durante las primeras dos semanas, esto se observó en la relación de AGV/AT la cual fue superior a 0,9; probablemente la acumulación de AGV como ácido acético, butírico, isobutírico y propiónico en los biorreactores fue la principal responsable de esta consecuencia y de la poca producción de biogás durante las primeras dos semanas del proceso especialmente para la M2, la cual presentó mayores concentraciones de ácidos grasos individuales en comparación con la M1. Además, el potencial de hidrógeno en M1 y M2 se vio favorecido durante todo el proceso de digestión anaerobia, por la capacidad reguladora del EC, lo cual evitó la acidificación del medio y mantuvo los valores

de pH dentro de lo establecido como óptimo por la literatura para llevar a cabo el proceso digestivo.

- Se evidencia la relación del balance nutricional (en términos de relación C/N) con los valores del potencial de biometanización obtenidos, debido a que M2 presentó mayor relación C/N, también fue la mezcla que obtuvo mayor rendimiento de producción de biogás con 54,68 ml de metano/ g SV; comparado con la M1, la cual presentó un PBM de 48,27 ml de metano/ g SV
- los valores obtenidos experimentalmente de PBM de M1 y M2, son inferiores a lo reportado por (muñoz, 2015) para el estiércol bovino (55-60mL de metano/ g SV), debido a cantidad de sólidos volátiles (SV) aportados principalmente por el estiércol ovino y caprino, generando que degradación de la materia orgánica se lleve a cabo más lentamente, afectando el proceso hidrolítico del proceso; debido a la poca eficiencia en la producción de biogás de 13% y 15% para M1 y M2 respectivamente, hace que las mezclas estudiadas no sean viables para su implementación en una planta piloto generadora de biogás.
- La composición del biogás de M1 y M2 en un periodo de 10 días mostró un 22% y 37% de CO_2 ; y un 30,5% y 38% para CH_4 , lo cual indica que durante este periodo de tiempo los biorreactores se encontraban en la fase acetogénica del proceso.
- Se sugiere realizar al presente estudio una Co-digestión anaerobia con un sustrato rico en azúcares, el cual aporte la glucosa y demás monosacáridos necesarios para alimentar las bacterias metanogénicas con el fin de incrementar la producción de metano en los reactores.
- Con el fin de optimizar la cuantificación e identificación de los azúcares y ácidos grasos individuales, se recomienda mejorar la técnica de HPLC y la preparación de las muestras, debido a que la composición de excretas animales son muy complejas.

- Se recomienda utilizar recipientes adecuados para el debido almacenamiento del biogás que se va analizar, con el fin de evitar entrada de aire atmosférico a la muestra y de evitar pérdidas de la misma. Además se recomienda realizar el análisis al biogás generado al finalizar el proceso.
- Se recomienda realizar la maceración a manera de pretratamiento, al estiércol ovino y caprino con el fin de que la materia orgánica se degrade en un menor tiempo a causa del rompimiento y disminución del tamaño del material lignocelulósico presentes en las muestras.

8. Divulgación de Resultados

Este trabajo de investigación se divulgó a través de la Presentación en modalidad de poster en el XXVI congreso internacional de investigación de materiales en Cancún-México celebrado del 20 al 25 de agosto del año 2017.

9. Bibliografía

- Abdeshahian, P., Lim, J. S., Ho, W. S., Hashim, H., & Lee, C. T. (2016). Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 714–723. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.117>
- Achinas, S., Li, Yu., Achinas, V., Willem, G. (2018). Influence of sheep manure addition on biogas potential and methanogenic communities during cow dung digestion under mesophilic conditions. *Sustainable Environment Research*, 30, 1-7.
- Acosta, Y., & Abreu, C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *Revista Del Instituto de Investigaciones de La Caña de Azúcar*, XXXIX(1), 35–48. <https://doi.org/0138-6204>
- Alvarez, R., & Lidén, G. (2008). Anaerobic co-digestion of aquatic flora and quinoa with manures from Bolivian Altiplano. *Waste Management*, 28(10), 1933–1940. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.11.002>
- American Public Health Association, A. W. W. A. (2009). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. España: Diaz de Santos.
- Anderson, G. k., & Yang, G. (1992). Determination of Bicarbonate and Total Volatile Acid Concentration in Anaerobic Digesters Using a Simple Titration. *Water Environment Research*, 64(1), 53–59. <https://doi.org/10.2175/WER.64.1.8>
- Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D., Plugge, C., & Stams, A. (2011). Bionethanation and its potencial. *Methods in Enzymology*, 494, 327–351. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385112-3.00016-0>
- Avcioglu, A. O., & Turker, U. (2012). Status and potential of biogas energy from animal wastes in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1557–1561.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.006>

Bureau veritas. (2008). *Manual para la formación en medio ambiente*. (Editorial Lex Nova, Ed.). España.

Bell, M; Wall, E; Rusell, G; Simm, G; Stott, A. (2011). The effect of improving cow productivity, fertility, and longevity on the global warming potential of dairy systems. *Journal of Dairy Science*, 94(7), 3662–3678.

Bermudez, J. J., Canovas, M., Manjon, A., & y otros. (1987). *La digestion anaerobia*. (universidad de Murcia, Ed.), *La digestion anaerobia*. Murcia, España.

Bezerra, R. A.; Rodriguez, J. A. D.; Ratusznei, S. M.; Zaiat, M.; Foresti, E. (2009). Effects of feed time, organic loading and shock loads in the anaerobic whey treatment by an Answer with circulation. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 157, 140–158.

Cabildo, P., Claramunt, R., Cornago, P., & Otros, Y. (2012). *Reciclado Y Tratamiento de Residuos*. (Universidad Nacional de Educsción a Distancia, Ed.). Madrid.

Cárdenas, J., Solorio, F., & Sandoval, C. (2004). *Ensilaje de forrajes: Alternatica para la alimentación de rumiantes en el trópico*. (Universidad Autónoma de Yucatán, Ed.), *Ensilaje de forrajes: Alternatica para la alimentación de rumiantes en el trópico*. Yucatán.

Carmona, J., Bolívar, D., & Giraldo, L. (2009). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias (Colombian Journal of Animal Science and Veterinary Medicine)*, 18(1), 49–63.

https://doi.org/http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1669-23142014000300009

Castillo, E.; Vergara, M.; Sandoval, C.; Cristancho, D.; Arenas, L.; Martinez, A.; Hernandez, M.;

- Luna, M.; Castillo, J. (2007). *Digestion anaerobia una alternativa para el tratamiento de residuos solidos urbanos*. UIS.
- Cendales, E. (2011). *Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable* (Tesis Magistral). Universiada Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería.
- Cestonaro, T., Costa, M. S. S. de M., Costa, L. A. de M., Rozatti, M. A. T., Pereira, D. C., Lorin, H. E. F., & Carneiro, L. J. (2015). The anaerobic co-digestion of sheep bedding and $\geq 50\%$ cattle manure increases biogas production and improves biofertilizer quality. *Waste Management*, 46, 612–618. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.040>
- conocimientosweb.net. (2013). Ingenierías: Clasificación de reactores químicos. Retrieved February 16, 2018, from <http://www.conocimientosweb.net/dcmt/ficha8575.html>
- Cunill, F., Iborra, M., & Tejero, J. (2010). *Reactores Químicos*. Barcelona, España: universitat de barcelona. Retrieved from [http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/12703/1/apunts de reactors químics.pdf](http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/12703/1/apunts_de_reactors_químics.pdf)
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., & y otros. (2014). *cambio climático 2014 mitigación del cambio climático. cambio climático 2014 Mitigación del cambio climático*. Retrieved from https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf
- Escalante, H., Guzman, C., & Castro, L. (2014). Digestion anaerobia del bagazo de fique: una alternativa energética. *DYNA*, 81(183), 74–85. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/dyna.v81n183.34382>
- Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H., Cardona, M., & Duarte, M. (2010). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Colombia. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Eskicioglu, C., & Ghorbani, M. (2011). Effect of inoculum/substrate ratio on mesophilic anaerobic digestion of bioethanol plant whole stillage in batch mode. *Process Biochemistry*, 46(8), 1682–1687. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.04.013>
- Florez, Y. (1982). *Generación de Biogás a partir de jugo de pulpa de café* (Tesis de grado). Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.
- Flotats, X., Bonmati, A., Fernandez, B., & Sales, D. (2016). *De residuo a recurso, el camino hacia la sostenibilidad*. (E. Mundi-prensa, Ed.). España.
- FONCODES. (2014). Producción y uso de abonos orgánicos : biol , compost y humus. In *Producción y uso de abonos orgánicos : biol , compost y humus* (pp. 9–20).
- Ganduglia, F. (2009). *Manual de biocombustibles*. (Instituto Interamericano de Cooperación para & Agricultura; Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y el Caribe., Eds.). Uruguay. Retrieved from http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/IICA/Manual_Biocombustibles_ARPEL_IICA.pdf
- Grau, M. D. (1999). *Estudio del comportamiento de reactores discontinuos y semicontinuos: modelización y comprobación experimental* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña.
- Herrero, J. M. (2006). Biodigestores de bajo costo para producir biogás y fertilizante natural a partir de residuos orgánicos. In *Biodigestores de bajo costo para producir biogás y fertilizante natural a partir de residuos orgánicos* (p. 12).
- Hilbert, J. (2003). *Manual para la producción de biogas*. Argentina: Instituto de Ingeniería Rural (INTA)- Castelar.
- Hogares juveniles campesinos. (2004). *Granja integral autosuficiente: manual*. (Editorial San

Pablo, Ed.). Bogotá.

Hristov, A., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., & y otros. (2013). *Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera*. (P. Gerber, B. Henderson, & H. Makkar, Eds.), *Fao*. Roma.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. (IDAE, Ed.). Madrid. Retrieved from http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf

Julio, I. (2016). *Evaluación del potencial de biometanización de la codigestión de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales mezclados con residuos de alimentos* (Tesis Magistral). Universidad de Antioquia.

Kondusamy, D., & Kalamdhad, A. (2014). Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production - A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 1821–1830.

Kumar, S. (2009). Anaerobic Reactor Configurations for Bioenergy Production. In S. Kumar (Ed.), *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications* (pp. 93–113). Hawaii, Estados Unidos: Blacwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780813804545>.

Li, Y., Zhang, R., Chen, C., Liu, G., He, Y., Liu, X. (2013). Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet, hemi-solid, and solid state conditions. *Bioresource Technology*, 149, 406-412.

Li, W., Hanan, M., Raza, F., He, Y., Zhang, R., Liu, G., Chen, C. (2018). Methane production through anaerobic co-digestion of sheep dung and waste paper. *Energy Conversion and Management*, 156, 279-287.

- Lobato, Á. (2012). *Estudio de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos con otros substratos agroindustriales* (Tesis Doctoral). Universidad de León, Área de Ingeniería Química.
- Magaña, J. L., Torres, E., Martínez, M. T., Sandoval, C., & Hernández, R. (2006). Producción de Biogás a Nivel Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras. *Acta Universitaria*, 16(2), 27–37. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41616204>
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Marti, N. (2006). *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process*. Florida, Estados Unidos: Dissertation.com.
- Martinez, J. (2014). Libro electrónico de bioquímica. Retrieved January 14, 2018, from <http://libroelectronico.uaa.mx/capitulo-12-otras-vias/fermentacion.html>
- Mejia, G. (1996). *Digestión anaerobia* (Folleto técnico, n. 1). *Digestión anaerobia*. Yucatan, Mexico: Univeridad Autonoma de Yucatán (UADY).
- Miale, J. (1985). Hematología: medicina de laboratorio. In Reverte (Ed.), *Hematología: medicina de laboratorio* (p. 501). Barcelona.
- Ministerio de energía de chile, FAO, PNUD, G. (2011). Manual de biogás. In *Manual de biogás* (Vol. 1, pp. 17–19). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia, & Unidad de Planeación Minero Energética. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Ministerio de Minas y Energía. Colombia. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mosquera, J., & Martinez, B. (2012). *Evaluación de la digestión anaerobia como alternativa de*

- estabilización de biosólidos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales de la universidad tecnológica Pereira* (Tesis Técnica). Universidad tecnológica de Pereira, Facultade de Tecnologías, Pereira (Colombia).
- Mshandete, A., Bjoirsson, L., Kivaisi, A., & y otros. (2006). Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste. *Renewable Energy*, 31(14), 2385–2392.
- Muñoz, N. (2015). *Valorización de Residuos de la Industria Agroalimentaria. Codigestión de estiércol de vacuno lechero y suero de quesería* (Tesis Doctoral). Universidad de Cantabria.
- Negroni, M. (2009). *Microbiología estomatológica*. (Panamericana, Ed.) (2nd ed.). Argentina.
- Núñez, J. (2001). Manejo y conservación de suelos. In EUNED (Ed.), *Manejo y conservación de suelos* (p. 43). Costa rica.
- Ongley, E. (1997). *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos*. (Organización de las Naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO), Ed.). Roma.
- Pan-in, S., & Sukasem, N. (2017). Methane production potential from anaerobic co-digestions of different animal dungs and sweet corn residuals. *Energy Procedia*, 138, 943-948.
- Pandey, P., Ndegwa, P., Soupir, M., Alldredge, R., & Pitts, R. (2011). Efficacies of inocula on the startup of anaerobic reactors treating dairy manure under stirred and untirred conditions. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2705–2720.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.03.017>
- Parra, B. (2014). *Producción de metano a partir de la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal* (Tesis Magistral). Universidad del valle, Facultad de Ingeniería. Retrieved from <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7645/1/7720-0446398.pdf>
- Parra, R. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas

residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Revista Producción + Limpia*, 10(2), 142–159.

Pavlostathis, S., & Giraldo, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Control*, 21(5–6), 411–490.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/10643389109388424>

Pinos, J. M., García, J. C., Peña, L. Y., Rendón, J. A., González, C., & Tristán, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de américa. *Agrociencia*, 46(4), 359–370.

Piowar, A., Dzikuc, M., & Adamczyk, J. (2016). Agricultural biogas plants in Poland – selected technological, market and environmental aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.153>

Quintero, M., & Rondon, Y. (2012). *Estudio preliminar para la produccion de biogas a partir de la digestion anaerobia de mucilago de cafe* (Trabajo de Grado). Universidad Industrial de Santander (UIS), Facultad de ingenierias fisico-químicas. Retrieved from <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2012/145234.pdf>

Risberg, K., Sun, L., Leven, L., & Schnurer, A. (2013). Biogas production from wheat straw and manure--impact of pretreatment and process operating parameters. *Bioresource Technology*, 149(1), 232–237. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.054>

Rivera, V. (2010). *Estudio cinético de la digestión anaeróbica temofilíca de pollinaza a escala piloto* (tesis Magistral). Instituto Politécnico Nacional.

Ruza, F. (2003). Cuidados intensivos pediátricos. In Norma-Capitel (Ed.), *Tratado de cuidados intensivos pediátricos* (pp. 1531–1535). España.

Saenz, J. (2017, August 7). En penumbras: 2,5 millones de colombianos no tienen energía

- eléctrica. *El Espectador*. Retrieved from <https://www.elspectador.com/economia/en-penumbras-25-millones-de-colombianos-no-tienen-energia-electrica-articulo-706892>
- Sánchez-Reyes, C., Patiño-Iglesias, M. E., Alcántara-Flores, J. L., Reyes-Ortega, Y., Pérez-Cruz, M. A., & Ortiz-Muñoz, E. (2016). Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(2), 191–198. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.05>
- Schoen, A., Sperl, D., Gadermaier, M., Goberna, M., Insam, H., & Wett, B. (2009). Population dynamics at digester overload conditions. *Bioresource Technology*, 100(23), 5648–5655.
- Shen, Y., Linville, J. L., Urgan-Demirtas, M., Mintz, M. M., & Snyder, S. W. (2015). An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 346–362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.129>
- Sierra, T., Enriquez, I., Gaxiola, S., Romo, J., Pourcher, A., & Barajas, R. (2016). Comportamiento de *Escherichia coli* en heces de vacas adicionadas con taninos hidrolizables. *Abanico Veterinario*, 6(3), 47–54. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21929/abavet2016.63.4>
- Toro, J., Mariscal, J., Aristizabal, B. (2017). Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio. *Revista Ion*, 30, 105–116. <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017008>.
- Tortora, G., & Funke, B. (2007). *Introducción a la microbiología*. (Panamericana, Ed.) (9th ed.). Argentina.
- Tricase, C., & Lombardi, M. (2009). State of the art and prospects of Italian biogas production from animal sewage: Technical-economic considerations. *Renewable Energy*, 34, 477–485. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.013>

- Varnero, M. (2011). *Manual de biogás*. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Ed.), *Manual de biogás*. Santiago de Chile. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Villanueva, J., Nájera, H., Gómez, J., Hernández, T., & Velasco, A. (2011). Generación, caracterización y uso del biogás, producto de la digestión anaerobia de las excretas de ganado bovino. *Lacandonia*, 5(2), 149–158.
- Wan, C., Zhou, Q., Fu, G., & Li, Y. (2011). Semi-continuous anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge and fat, oil and grease. *Waste Management*, 31(8), 1752–1758. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.025>
- Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, T. R., Kohli, S., & Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques - A review. *Bioresource Technology*, 95(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.010>
- Yen, H., & Brune, D. (2007). Anaerobic co-digestion of algal sludge and wastepaper to produce methane. *Bioresource Technology*, 98(1), 130–134. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.010>
- Zinder, S., & Koch, M. (1984). “Non-acetoclastic methanogenesis from acetate: acetate oxidation by a thermophilic syntrophic co cultura. *Archives of Microbiology*, 138, 263–272.

Apéndices

Apéndice A. Lista de equipos y materiales utilizados en el presente estudio.

- a- **Equipos:** cromatógrafo de líquidos de alta resolución- Agilent Technologies 1200 series; Centrifugadora Thermo Scientific 4000 rpm; balanza digital Pioneer Ohaus, pesa de 0,0001-210g; placa de calentamiento Radley Tech; desecador Duran.

- b- **Materiales:** Vasos de precipitado, pipetas volumétricas de 5 y 10mL, probetas, Buretas de 25mL, vidrio de reloj, varillas de agitación, , microespátulas, agujas hipodérmicas, mangueras de microgoteo, peras de succión, balón fondo redondo, condensador tipo rosario- esmerilado, tiras para medición de pH.

Apéndice B. Tabla de reactivos utilizados

Compuesto	Pureza (%)	Casa comercial
Ácido acético	Grado analítico	Sigma Aldrich
Ácido butírico	Grado analítico	Sigma Aldrich
Ácido clorhídrico	99	Merck
Ácido isobutírico	Grado analítico	Sigma Aldrich
Ácido propiónico	Grado analítico	Sigma Aldrich
Ácido sulfúrico	99	Merck
Arabinosa	Grado analítico	Merck
Carbonato de calcio	99	Panreac
Celobiosa	Grado analítico	Merck
Fenolftaleína		Merck
Glucosa	Grado analítico	Merck
Hidróxido de sodio	99	Merck
Xilosa	Grado analítico	Merck

Apéndice C. Seguimiento parámetros AGV y AT para cada reactor

Reactor	Semana	AGV [mg Ac. Acético/L]	Alcalinidad [mg CaCO ₃ /L]
EO	1	2250	1960
	2	1440	1450
	3	1850	1920
EC	1	3500	3100
	2	4250	4800
	3	3750	4700
EB	1	2160	2000
	2	1620	1750
	3	1450	1600
M1	1	3000	3000
	2	2160	2400
	3	1920	2200
	4	1680	1800
	5	1560	1800
M2	1	3240	2900
	2	2360	2350
	3	1900	2100
	4	2040	2150
	5	2040	2300

Apéndice D. Producción de biogás de cada inóculo durante un periodo de tiempo de 3 semanas.

EO		EC		EB	
Tiempo (días)	Volumen (mL)	Tiempo (días)	Volumen (mL)	Tiempo (días)	Volumen (mL)
1	4,2	1	5	1	3,5
2	6	2	7,5	2	4,7
3	8,6	3	9,3	3	6,2
5	11,5	5	12,6	5	8,7
7	14,3	6	13,8	6	10,1
9	16,7	9	17,8	9	12,6
10	19,5	10	20,5	10	14,9
11	21,3	11	22,7	11	16,2
14	24,6	13	25,3	13	17,8
15	26	15	27,9	15	19,6
16	29,1	16	31,8	16	21,1
17	31,1	17	34,1	17	22,1
18	32,6	18	36,6	18	22,9
21	35,3	21	40,6	21	24,7

Apéndice E. Producción de biogás de las mezclas utilizadas M1 y M2, durante un periodo de 5 semanas.

Mezcla 1(EO 12,3%-EB 8,7%-EC 4%)		Mezcla 2(EO 8,7%-EB 12,3%-EC 4%)	
Tiempo (días)	Volumen (mL)	Tiempo (días)	Volumen (mL)
1	3,95	1	3,88
2	6,24	2	5,90
3	7,85	3	7,85
5	11,01	5	11,53
7	14,00	7	15,10
9	17,54	9	19,29
10	20,18	10	22,19
11	22,54	11	24,40
13	26,10	13	28,51
14	31,20	14	36,25
16	35,95	16	41,06
17	42,58	17	49,34
18	47,41	18	53,50
21	61,00	21	66,50
23	71,35	23	87,20
24	77,75	24	95,03
25	85,67	25	100,92
26	95,70	26	106,36
28	119,89	28	127,86
30	130,14	30	135,36
33	146,70	33	150,11
35	146,70	35	150,11

Apéndice F. Resultado obtenidos en el análisis por cromatografía de gases

a- Composición del biogás para la mezcla 1

Mezcla 1 (EO 12,3%-EB 8,7%-EC 4%)		
Compuesto	Concentración (ppm)	%
Dióxido de carbono (CO₂)	115819	21,611
Metano (CH₄)	163391	30,487
Monóxido de carbono (CO)	< 2	3,73x10 ⁻⁴ %
Hidrógeno (H₂)	< 2	3,73x10 ⁻⁴ %
Oxígeno (O₂)	50594	9,440
Nitrógeno (N₂)	206130	38,462
Total	535936	100%

b- Composición del biogás para la mezcla 2

Mezcla 2 (EO 8,7%-EB 12,3%-EC 4%)		
Compuesto	Concentración (ppm)	%
Dióxido de carbono (CO₂)	211586	36,971
Metano (CH₄)	217641	38,029
Monóxido de carbono (CO)	< 2	3,49x10 ⁻⁴ %
Hidrógeno (H₂)	< 2	3,49x10 ⁻⁴ %
Oxígeno (O₂)	28814	5,035
Nitrógeno (N₂)	114262	19,965
Total	572305	100%