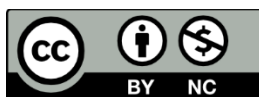


ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA FACTIBILIDAD ENERGÉTICA QUE TIENEN
LOS EXCREMENTOS SÓLIDOS DE LOS ANIMALES TERRESTRES DEL BIOPARQUE
LOS OCARROS PARA PRODUCIR BIOGÁS EN UN BIODIGESTOR



DIANA CAROLINA AVILA SÁNCHEZ
LINA VANESSA PADILLA PÉREZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2019

ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA FACTIBILIDAD ENERGÉTICA QUE TIENEN
LOS EXCREMENTOS SÓLIDOS DE LOS ANIMALES TERRESTRES DEL BIOPARQUE
LOS OCARROS PARA PRODUCIR BIOGÁS EN UN BIODIGESTOR

DIANA CAROLINA AVILA SÁNCHEZ
LINA VANESSA PADILLA PÉREZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director:

PhD.CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA
PhD, Msc, Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2019

Autoridades Académicas

P. José Gabriel MESA ANGULO, O. P.

Rector General

P. Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Arturo RESTREPO RESTREPO O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Adm. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de la Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota de aceptación

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de Facultad de Ingeniería Ambiental

CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

Director Trabajo de Grado

MARIA ALEXANDRA MÉNDEZ LEAL

Jurado

OLGA LUCIA CUBIDES DUSSAN

Jurado

Villavicencio, Septiembre de 2019

Principalmente a Dios por habernos dado la vida y permitirnos haber llegado hasta este momento tan importante de nuestra formación profesional, por darnos la salud, sabiduría, paciencia y responsabilidad que necesitamos para cumplir esta meta.

A nuestros padres, por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en nuestras expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado, que a pesar de nuestra distancia física siempre nos brindaron su apoyo y nos dieron una voz de aliento en los momentos difíciles para seguir por nuestro objetivo.

Agradecimientos

Quiero expresar un sincero agradecimiento, en primer lugar, a Dios por ser nuestra guía y acompañarnos en el transcurso de este proceso, brindándonos salud, paciencia, sabiduría y fortaleza para concluir con éxito la meta trazada.

También agradecemos a nuestros padres quienes son nuestro motor y mayor inspiración, por todo su amor, apoyo y comprensión en las diferentes etapas de nuestra carrera profesional.

A cada uno de los docentes de la facultad de Ingeniería Ambiental, en especial a nuestro director de tesis el Ingeniero Químico Christian José Rojas Reina quien con su experiencia, conocimiento y motivación nos orientó en el proceso investigativo para cumplir a cabalidad los objetivos planteados.

Tabla de contenido

	Pág.
Resumen.....	15
Abstract.....	16
1. Introducción.....	17
2. Planteamiento del problema	18
2.1 Hipótesis.....	19
3. Objetivos.....	20
3.1 Objetivo general	20
3.2 Objetivos específicos.....	20
4. Justificación.....	21
5. Alcance del proyecto	22
6. Antecedentes.....	23
7. Marco de referencia.....	25
7.1 Marco teórico	25
7.2 Marco conceptual	29
7.3 Marco legal.....	32
8. Metodología.....	34
8.1 Fase 1. Acondicionamiento de los excrementos sólidos para la digestión anaerobia	34
8.1.1 Diagnóstico de las áreas de manejo de los animales.	34
8.1.2 Generación de excrementos sólidos por los animales terrestres.....	34
8.1.3 Recolección y preparación de los excrementos sólidos.....	34
8.2 Fase 2. Caracterización de parámetros fisicoquímicos del sustrato	35
8.3 Fase 3. Determinación de la tasa específica de producción de biogás y porcentaje de metano	36
9. Resultados y análisis.....	38
9.1 Fase 1. Acondicionamiento de los excrementos sólidos para la digestión anaerobia	38
9.1.1 Diagnóstico de las áreas de manejo de los animales.	38
9.1.2 Generación de excrementos sólidos por los animales terrestres.....	41

9.1.3 Recolección y preparación de los excrementos sólidos.....	44
9.2 Fase 2. Caracterización de parámetros fisicoquímicos del sustrato.....	45
9.2.1 Determinación de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV) en digestión anaerobia.....	45
9.2.2 Determinación de S, N, C, P.....	49
9.2.3 Determinación de pH.....	52
9.2.4 Determinación de DQO.....	55
9.3 Fase 3. Determinación de la tasa específica de producción de biogás y porcentaje de metano.....	56
10. Discusión.....	68
11. Conclusiones.....	70
12. Recomendaciones.....	71
13. Referencias bibliográficas.....	72
14. Anexos.....	80

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Condiciones óptimas para el desarrollo de microorganismos generados por biogás.....	26
Tabla 2. Cantidad de biogás producido por diferentes materias primas.	27
Tabla 3. Tiempo de retención (Tr) según la temperatura.....	28
Tabla 4. Porcentaje de sólidos totales (ST) en diferentes excrementos sólidos de animales.....	29
Tabla 5. Porcentaje de sólidos volátiles (SV) en diferentes excrementos sólidos de animales. ..	29
Tabla 6. Normatividad vigente colombiana en relación a las energías renovables.	32
Tabla 7. Parámetros, métodos y equipos que se utilizaron para realizar la caracterización.	35
Tabla 8. Diagnóstico de las áreas de manejo.	39
Tabla 9. Animales objeto de estudio.	40
Tabla 10. Cantidad de excrementos generados.....	42
Tabla 11. Cantidad de excrementos utilizados para el estudio.	44
Tabla 12. Excretas e inóculos empleados en el estudio.	45
Tabla 13. Determinación de ST, SV y humedad a excrementos sólidos de animales terrestres objeto de estudio.	46
Tabla 14. Determinación de ST, SV y humedad a excrementos sólidos de cerdo.....	47
Tabla 15. Determinación de ST, SV y humedad al inóculo del reactor (USTA).....	48
Tabla 16. Determinación de ST, SV y humedad al inóculo del Centro Agroecológico La Cosmopolitana.	48
Tabla 17. Determinación de ST,SV y humedad al inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve.....	49
Tabla 18. Determinación de S, N, C, P a excrementos sólidos de animales terrestres objeto de estudio.	50
Tabla 19. Determinación de S, N, C, P a excretas de cerdo.	50
Tabla 20. Determinación de S, N, C, P a inóculo de la Cosmopolitana.	51
Tabla 21. Determinación de S, N, C, P al inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve.	52
Tabla 22. Determinación de pH a muestras de estudio.....	53

Tabla 23. Determinación de pH en mezclas inóculo:sutrato.	54
Tabla 24. DQO en excretas del Bioparque Los Ocarros.	55
Tabla 25. DQO en inóculo de la Cosmopolitana.	56
Tabla 26. DQO en inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve.....	56
Tabla 27. Relaciones, inóculos y excretas empleadas para cada montaje.	57
Tabla 28. Montaje experimental 4x1.	58
Tabla 29. Datos de la producción diaria de biogás normalizados y su acumulativo.	61
Tabla 30. Datos de la producción diaria de biogás normalizados y su acumulativo.	64
Tabla 31. Potencial de biogás obtenido de las excretas de cerdo de la Unillanos.	67

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Ubicación área de estudio.....	22
Figura 2. Montaje experimental para la obtención del porcentaje de metano	36
Figura 3. Montaje experimental para obtención de la tasa específica de biogás	37
Figura 4. Recorrido que se realizó a las áreas de manejo de los animales objeto de estudio	38
Figura 5. Estado en el que se encuentra una de las áreas de manejo donde habitan los animales utilizados para la investigación.	39
Figura 6. Recolección, pesaje y disposición final de excrementos sólidos durante los quince días de muestreo	41
Figura 7. Peso total diario de excrementos que generan los animales objeto de estudio durante los quince días de pesaje	43
Figura 8. Montaje experimental realizado para la obtención de biogás y metano.....	58
Figura 9. Alimentación reactor propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve tipo Fed – Batch, ubicado en el laboratorio de conversión de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio	60
Figura 10. Medición de producción de biogás cada 3 horas en reactor de Martínez tipo Fed – Batch	60
Figura 11. Comportamiento diario de la producción de biogás utilizando una relación 1:7 en excretas de cerdo Unillanos con inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve y de la Cosmopolitana	62
Figura 12. Comportamiento acumulativo de la producción de biogás utilizando una relación 1:7 en excretas de cerdo Unillanos con inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve y de la Cosmopolitana	63
Figura 13. Comportamiento diario de la producción de biogás utilizando una relación 1:10 en excretas de cerdo Unillanos con inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve y de la Cosmopolitana.	65
Figura 14. Comportamiento acumulativo de la producción de biogás utilizando una relación 1:10 en excretas de cerdo Unillanos con inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve y de la Cosmopolitana	65

Lista de anexos

	Pág.
Anexo 1. Diagrama de flujo de la metodología.....	80
Anexo 2. Evidencia de la homogenización de las excretas a utilizar.	82
Anexo 3. Biomasa alimentada (excretas de animales) y biomasa activa (inóculo) que se utilizaron para la investigación.	82
Anexo 4. Determinación de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles para excretas e incóculos utilizados.	84
Anexo 5. Expresión de la recta correspondiente para obtener la equivalencia en mg/L de los compuestos DQO, S, N, P, NO ₃ ⁻	85
Anexo 6. Montaje experimental a escala piloto utilizando las excretas del Bioparque Los Ocarros y excretas de los cerdos de la Unillanos	88

Lista de ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1. Cálculo del volumen del digestor (Campos, 2011).....	44
Ecuación 2. Cálculo de sólidos totales (APHA, AWWA, & WPCF, 1992).....	45
Ecuación 3. Cálculo de sólidos volátiles (APHA, AWWA, & WPCF, 1992).....	45
Ecuación 4. Cálculo del volumen de biogás obtenido (DQS, 2010).....	61
Ecuación 5. Cálculo del potencial de biogás obtenido (DQS, 2010).....	67

Resumen

Este proyecto de investigación analiza la factibilidad energética que tienen los excrementos sólidos de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros para producir biogás en un biodigestor. Esto con el fin de explorar nuevas alternativas en el manejo que se le puede dar a este tipo de residuos, así como la producción de energía renovable que contribuya al equilibrio ambiental. Para lograr este objetivo la metodología se desarrolló en tres etapas: 1) Preparación de los excrementos sólidos a evaluar, 2) Caracterización del sustrato mediante parámetros establecidos y 3) Cálculo de la tasa específica de producción de biogás y porcentaje de metano.

Después de 4 meses de pruebas en los resultados obtenidos se pudo evidenciar, que las excretas de los animales exóticos del Bioparque Los Ocarros a pesar de tener una caracterización en términos de materia orgánica (ST, SV, DQO) similar a las excretas porcinas y otros rumiantes que se emplean actualmente para producir biogás, no cuentan con las condiciones necesarias para producir biogás. Caso contrario de las excretas de cerdo, con las cuales se realizaron corridas experimentales, como estrategia para descartar fallas a la hora de realizar el montaje experimental, las cuales produjeron biogás en las mismas condiciones experimentales. Esta escasa producción de biogás se infiere es a causa de los medicamentos a los que son sometidos los animales exóticos del Bioparque (antibióticos y parasitarios) que pueden inhibir las bacterias anaerobias necesarias para el proceso de digestión de la materia orgánica. Ya que los mismos inóculos fueron efectivos para degradar excretas porcinas.

Palabras clave: Excrementos sólidos, biogás, inóculos, energías alternativas, digestión anaerobia.

Abstract

This research project analyzes the energetic feasibility contained in the faeces of the land animals living in Los Ocarros to produce biogas in a biodigester. The main objective of this research is to explore new ways of managing this type of waste as a way to produce renewable energy to contribute to the ecological balance. To reach this objective three steps were followed 1) Preparing the faeces to evaluate, 2) Characterizing the substrate through established parameters and 3) Calculating the specific rate of biogas production and the percentage of methane.

After 4 months of experimentation we could find evidence in the results that the faeces of the exotic animals of Los Ocarros, instead of having a similar characterization of organic matter (ST, SV, DQO) to the faeces of swines and other ruminants, that are used to produce biogas, don't come with the conditions needed to produce biogas. On the other hand, pigs' faeces, that were used for experimental runs as a strategy to avoid failure at the time of assembly, produced biogas in the same experimental conditions. This low production of biogas is thought to be due to the medication to which the exotic animals are subjected (antibiotics and parasitics) that can inhibit the anaerobic bacteria needed in the process of the organic matter's digestion. Since the same inoculum was effective to degrade the pig's faeces.

Key words: solid faeces, biogas, inoculum, alternative energy, anaerobic digestion.

1. Introducción

Desde sus inicios, el mundo ha sido afectado por las diferentes acciones producto de la actividad humana, causando impactos negativos en diferentes aspectos, tales como la biodiversidad, el ambiente y los recursos naturales. Es por ello, que la indagación de nuevas alternativas para confrontar esta realidad conlleva a un compromiso no solo ético sino social. Partiendo de los objetivos de desarrollo sostenible, y con el fin de aportar en el mejoramiento de las condiciones del planeta, es indispensable redireccionar la economía con patrones más sostenibles, para lo cual, es pieza clave la innovación y desarrollo de las mismas en materia de tecnologías y métodos eficientes para incrementar la productividad sin vulnerar la capacidad de carga del planeta y su biodiversidad (Jaramillo, 2018).

Por esta razón, la aplicación de nuevas tecnologías sostenibles como la digestión anaeróbica ha tenido un gran auge en diferentes países como China, Alemania e India, ya que ha contribuido al aumento de la producción de biogás usando desechos de los sectores agropecuarios. Así mismo, Colombia le ha apostado a la producción masiva de energía mediante el biogás, a través de lagunas anaerobias para la generación de electricidad, como es el caso de la extractora Palmeiras y Fedepalma, la cual ya cuenta con plantas de tamaño industrial (Conil, 2000).

La digestión anaerobia es un procedimiento de descomposición en ausencia de oxígeno de materia orgánica como excrementos de animales y residuos agroindustriales, los cuales son transformados en biogás a través de un proceso microbiano (Solano, 2018).

Este proyecto se realiza con el fin de ofrecer alternativas a la contaminación generada por el manejo de los residuos provenientes de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros ya que es un recinto que cuenta con el albergue de animales típicos de la Orinoquía que generan excretas a diario, susceptibles de su aprovechamiento por medio de la digestión anaerobia.

2. Planteamiento del problema

Los zoológicos se conocen como un recinto, en el cual se sostiene un conjunto de animales en sujeción con propósitos educativos y de conservación, los cuales a través de estudios investigativos buscan obtener resultados informativos acerca de sus conexiones biológicas (Teilen, 2018).

Uno de los estudios que ha despertado mayor interés con los animales que habitan estos recintos es el relacionado con las diferentes estrategias de aprovechamiento de los excrementos generados por los mismos, ya que estos ocasionan deterioro al medio ambiente si no se cuenta con una práctica segura y efectiva para aprovecharlos o eliminarlos. Si bien se han realizado investigaciones en cuanto a la producción de biogás utilizando las excretas de animales bovinos, porcinos y caninos, entre los que se puede mencionar el caso de la hacienda Cosmopolitana en Villavicencio-Meta (Ardila, Daza, Jاسبón, & Nuñez, 2019), en la zona rural de Ciudad Bolívar en Bogotá implementando como sustrato excretas porcinas y materia fecal producida por los caninos que habitan en el refugio animal Milagros (Rodríguez & García, 2017), así como en New York aprovechando los excrementos generados por los perros en la vía pública para la producción de biogás (Rico, 2018).

No obstante, el problema es que en cuanto a antecedentes de indagaciones con animales propios de la región Orinoquía no se encontraron registros debido a la naturaleza de los mismos.

Partiendo de lo indicado anteriormente, el Bioparque Los Ocarros cuenta aproximadamente con 85 animales terrestres, de los cuales no hay registro de la cantidad de excrementos que estos generan a diario y que a la fecha son recolectados y depositados en el punto de compostaje, siendo estos susceptibles de producir biogás, con el objetivo de reducir la contaminación ocasionada al medio ambiente y proponer una solución viable para suplir el gasto energético que requiere las instalaciones del Bioparque para su funcionamiento. Este proyecto tiene como propósito aprovechar en su totalidad la generación de esta materia prima (excrementos sólidos) proveniente de los animales terrestres que habitan en las instalaciones para la obtención de biogás que podría ser empleado como biocombustible para la cocción de alimentos, calefacción, encender motores, entre otros, mediante el proceso de digestión anaerobia. (Solano, 2018)

2.1 Hipótesis

Los excrementos de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros son factibles para producir biogás a una tasa similar de los animales porcinos y bovinos. Caso contrario podría ser que el biogás a producir por las excretas de estos animales sea inferior al de los porcinos y bovinos y no sean viables para generar biogás de manera efectiva.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Determinar la factibilidad energética de los excrementos sólidos producidos por los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros para obtener biogás en un biodigestor.

3.2 Objetivos específicos

- Acondicionar los excrementos producidos por los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros que servirán como sustrato para la biodigestión.
- Caracterizar el sustrato preparado que se utilizará para la producción de biogás.
- Calcular la tasa específica de producción de biogás y el porcentaje de metano.

4. Justificación

Los excrementos sólidos de animales han generado un gran interés por su potencial energético, brindando así alternativas de aprovechamiento aplicadas en diferentes campos como la obtención de biogás generado por la descomposición de materia orgánica que se encuentra en las excretas; referente a esta práctica se encuentran estudios de investigación como la realizada en Pasto-Nariño titulada “Obtención de biogás a partir de estiércol de cerdo utilizando un biodigestor tipo tubular” realizada por Nectario Pantoja y Ángela Parra cuyo propósito es dar a conocer una propuesta de energía renovable que satisfaga un servicio básico como lo es la cocción de alimentos preservando un ambiente sano (Arley & Parra , 2017).

Cabe resaltar que el aprovechamiento del metano generado por los excrementos sólidos, aparte de la producción de energía, tiene otras ventajas como la reducción de emisión de gases de efecto invernadero y la mitigación del cambio climático evitando que el metano se libere al aire, así como el mejoramiento de las condiciones de higiene, al tratar las excretas de animales para producir bioabono (Ainfar, 2017).

Es por ello, que la generación y uso del biogás como fuente de energía renovable es una opción con garantía de rentabilidad, pues no sólo contribuye a la solución de un problema ambiental al momento de reutilizar la materia orgánica generada (excrementos sólidos), sino que les permitiría a las instalaciones del Bioparque en un futuro si llegasen a implementarlo, lograr un ahorro económico, al generar biogás, el cual podría llegar a utilizarse para diferentes usos como la cocción de alimentos, calefacción, encender motores a base de biogás entre otros.

Además, este estudio experimental busca dar a conocer el potencial energético del sustrato obtenido de los excrementos de los animales terrestres de la región Orinoquía, aportando su máximo beneficio para contribuir al equilibrio ambiental en la zona del Bioparque, que se encuentra en la Reserva Forestal Protectora Vanguardia, reduciendo en gran medida los efectos que ocasionan la generación y desaprovechamiento de los mismos.

Para la realización de este estudio, es necesaria la determinación del potencial de biogás del sustrato, mediante el método estándar, que permite determinar la producción de biogás de estas excretas y poderla comparar con otras, de diferentes partes del mundo.

6. Antecedentes

La digestión anaerobia ha despertado gran interés a partir del siglo pasado, generando una gran actividad en el área de investigación del proceso anaerobio, por lo que existe un gran número de estudios que evidencian la utilidad de esta técnica en diferentes lugares del mundo, empleando como sustrato principalmente las excretas de animales y residuos vegetales o los llamados cultivos energéticos, como es el caso del maíz considerado en Alemania la principal materia prima para producir biogás y abastecer la red domiciliar local (Manfredi, 2014), al igual que en Nigeria y China donde aprovechan el girasol mexicano con los excrementos de aves de corral con el fin de reducir los residuos de granjas y evitar la amenaza para las especies autóctonas (Portillo, 2017).

Cabe resaltar, que en temas de producción de biogás a partir de excretas de animales, generalmente se han utilizado heces de ganado porcino como en el estado de Guanajuato-México, donde a través de un estudio evalúan el potencial energético de este sustrato para la producción de biogás (Martínez, 2015), así como en África donde se han implementado plantas de biogás comunitario y doméstico a partir de excrementos de vaca (Rico, 2016) y en Inglaterra usando excretas de animales no convencionales, como las de los caninos para alumbrar farolas con dichos excrementos (Rico, 2018). Por otra parte, en la Universidad Nacional de Colombia (U.N.) Sede Manizales, se han iniciado prácticas como lo son el diseño de un biodigestor a partir de poda y residuos alimenticios con el fin de aprovechar un porcentaje y el restante utilizarlo para la generación de biogás (Agencia de Noticias UN, 2016). Del mismo modo en el departamento de Cundinamarca, se han realizado investigaciones para determinar el potencial de producción de biogás de los residuos agroindustriales a través de digestión anaerobia y su oportunidad de emplearla en el país (Montenegro, Rojas, Cabeza, & Hernández, 2016).

Si bien se han realizado estudios con las excretas de este tipo de animales, la experiencia con animales exóticos es muy poca ya que alrededor del mundo sólo 5 zoológicos tienen investigaciones en este sentido. Uno de ellos es el zoológico de Londres donde utilizan los residuos de los animales carnívoros para convertirlos en energía utilizable por la planta de “energía a partir de residuos”, reduciendo la contaminación de los mismos al medio ambiente (Stelfox, 2019).

El zoológico de Munich tiene experiencias en esta área, donde se construyeron tres contenedores grandes, cada uno con la capacidad de contener 100 metros cúbicos

aproximadamente de desechos animales equivalente a una semana de recolección de estiércol de todos los animales herbívoros del zoológico (Nick Glass, 2011). Estos residuos son alimentados en su propia planta de producción de biogás, generándose el 5% de las necesidades energéticas del zoológico (Stelfox, 2019).

Asimismo, el zoológico de Toronto a través de un proyecto conocido como ZooShare transforma los excrementos producidos por los animales que lo habitan en energía eléctrica para la Red Eléctrica de Ontario. Se cuenta con una planta de biogás con capacidad de 500Kw alimentada a partir de 3.000 toneladas de excrementos. Esta planta sirve además como centro educativo para discutir temas como el funcionamiento del biodigestor y estrategias para el mejoramiento del medio ambiente (Ini, 2015).

Un caso muy similar es el del Zoológico de Detroit (Estado de Michigan), donde se generan más de 400 toneladas de estiércol anualmente utilizados para producir biogás y energizar posteriormente el Complejo de Salud Animal Ruth Roby Glancy (Michigan Economic Development Corporation (MEDC), 2015). Es catalogado como el primer zoológico estadounidense en construir un biodigestor propio a partir de excrementos de sus animales.

El último antecedente en este sentido se encuentra en el Zoológico de Hellbrunn en el Estado de Baviera-Alemania. La totalidad del estiércol animal y los alimentos no consumidos son utilizados para generar calor y electricidad a través de una planta de biogás. Los animales juegan un papel importante en el aporte para esta producción, son cinco elefantes, dos rinocerontes indios y tres jirafas, además de algunos búfalos y antílopes, generando cerca de 2.000 toneladas de estiércol, de las cuales se obtiene 230.000 kWh de electricidad y 240.000 kWh de calor aproximadamente (Ini, 2015).

7. Marco de referencia

7.1 Marco teórico

El resultado principal del proceso de la digestión anaerobia es el biogás, gas compuesto por una mezcla de metano (50-70%) y dióxido de carbono (30-50%), con bajas cantidades de otros compuestos (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno). Para que se lleve a cabo la digestión anaerobia es necesario usar como sustratos materia orgánica (excretas, residuos de comida, entre otros) para que se pueda producir biogás (Lorenzo & Obaya, 2005).

Este biogás es el resultado de la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno y se le conoce comúnmente como digestión anaerobia. Este proceso presenta un ambiente en condiciones bastante difíciles que hacen que a las moléculas de oxígeno les sea casi imposible entrelazarse entre sí para formar O_2 (Hanson, 2018). La digestión anaerobia se caracteriza por ser un proceso biológico que consiste en la descomposición del sustrato orgánico en gases (biogás) y una variedad de minerales (C, N, P, K, S) en su producto remanente líquido. Este es considerado además, uno de los procesos más aptos para reducir el impacto generado por las emisiones de gases de efecto invernadero, al igual que el aprovechamiento energético que producen los desechos agrícolas como las excretas porcinas y bovinas (Biodisol, 2018).

Durante este proceso, sobre la materia orgánica influyen múltiples grupos de bacterias anaerobias facultativas y anaerobias estrictas que usan los productos metabólicos generados por cada grupo en manera secuencial. El grupo de carbonos y electrones producidos durante la degradación anaerobia de los compuestos orgánicos implican tres grandes grupos tróficos:

Grupo I. Bacterias hidrolíticas y fermentativas.

Grupo II. Bacterias acetogénicas.

Grupo III. Bacterias metanogénicas (Diaz, Espitia, & Molina, 2002).

El desarrollo de degradación anaerobia ocurre en ausencia de oxígeno. Una suma de microorganismos que laboran en serie o serie paralelo, degradan la materia orgánica en diferentes etapas. Durante el trabajo de ingeniería se tiene en cuenta tres etapas para residuos sólidos o lodos

(hidrólisis, acidogénesis, metanogénesis) y dos para residuos líquidos (acidogénesis y metanogénesis); sin embargo, el enfoque más novedoso y más ampliamente utilizado por investigadores lo constituye cuatro etapas o niveles tróficos (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) (Lorenzo & Obaya, 2005).

Hidrólisis o liquefacción: En esta etapa los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que ejercen en la superficie celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es entonces, la evolución de los polímeros en sus respectivos monómeros.

Acidogénesis: En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que incluyen los productos de la hidrólisis son transformados en ácidos orgánicos tales como ácido acético, propiónico y butírico, básicamente.

Acetogénesis: También conocido como acidogénesis intermediaria, donde los productos de la acidogénesis son transformados en ácido acético, hidrógeno y CO₂.

Metanogénesis: En esta fase el CH₄ es generado a partir del ácido acético o la mezcla de H₂ y CO₂, o a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol. El papel de las bacterias metanogénicas se determina por el tipo de sustrato disponible (Lorenzo & Obaya, 2005).

Tabla 1. Condiciones óptimas para el desarrollo de microorganismos generados por biogás.

Parámetros	Bacterias hidrolíticas y acidogénicas	Bacterias metanogénicas
Tiempo de reproducción	De 3 horas a 3 días	De 6 a 14 días
Temperatura óptima	30-65°C	37°C o 55°C
pH	Mínimo hasta 3,5 y máximo 7,8	Cerca de 7-8
Vitalidad	Robusta, resisten perturbaciones en la temperatura y el pH	Muy sensibles frente a cualquier perturbación en el pH y la temperatura
Sensibilidad aerobia	Trabajan también ante la introducción de oxígeno cuando se produce en la carga del depósito de hidrólisis	Mueren al contacto con el oxígeno
Producción de biogás	Poca, cantidad de metano 0-30%	Alta, cantidad de metano >50%

Nota: Comparación de los parámetros necesarios para el crecimiento óptimo de las bacterias participantes en la producción de biogás. Adaptado de (Castillo, 2018).

Hay que mencionar, además que existen diferentes factores que afectan la generación de biogás tales como:

Materia prima: La materia prima fermentable en este caso en particular los excrementos sólidos de animales terrestres, no sólo requieren de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que deben contar además con un equilibrio de sales minerales como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno y níquel, los cuales normalmente presentan estos elementos en cantidades adecuadas. Asimismo, es importante señalar que la degradación de este tipo de materia prima puede verse afectada tanto por el tipo de animal como por la alimentación que haya recibido el mismo (Universo Porcino, 2019).

Tabla 2. Cantidad de biogás producido por diferentes materias primas.

Estiércol	Disponibilidad Kg/día*	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m ³ /kg húmedo	m ³ /día/año
Bovino (500 kg)	10,00	25:1	0,04	0,400
Porcino (50 kg)	2,25	13:1	0,06	0,135
Aves (2 kg)	0,18	19:1	0,08	0,014
Ovino (32 kg)	1,50	35:1	0,05	0,075
Caprino (50 kg)	2,00	40:1	0,05	0,100
Equino (450 kg)	10,00	50:1	0,04	0,400
Conejo (3 kg)	0,35	13:1	0,06	0,021

Nota: Producción de biogás por diferentes tipos de residuo animal, Adaptado de (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011)

Sustrato: Los sustratos orgánicos se componen principalmente de polisacáridos (azúcares), proteínas, grasas (lípidos) y pequeñas cantidades de metabolitos, la mayoría de ellos insolubles en agua (Galvez, 2017). Pueden ser de dos tipos de residuos, líquido principalmente de alta concentración y sólidos como biorresiduos de origen municipal (BOM), residuos agroindustriales, residuos de cultivos, lodos originados del tratamiento de agua residual industrial y como es el caso de estudio materiales de origen animal como estiércol. Es importante, además tener en cuenta que la composición y la concentración del sustrato pueden originar fenómenos de inhibición que afectan el metabolismo de los microorganismos y por ende la cantidad de CH₄ generado (Cárdenas, Parra, Torres, & Vásquez, 2016).

Inóculo: La inclusión de un inóculo es un componente trascendental en el funcionamiento del reactor, por ello, tanto la cantidad como calidad son de vital importancia ya que definen la duración

del arranque y el desempeño del mismo. Es allí donde inicia el crecimiento de la biomasa activa y toma las propiedades requeridas para la remoción de la materia orgánica logrando reducir de esta manera el tiempo de digestión. Tiempo que será reducido si el inóculo posee células jóvenes y activas (Córdoba, Fernández, & Santalla, 2014).

Tiempo de retención: Se denomina como el período de tiempo que la materia orgánica se encuentra en el sistema para obtener la degradación. El tiempo de retención se encuentra vinculado con las condiciones óptimas del proceso y la temperatura ambiente, con temperatura de 30°C, el tiempo de retención (Tr) debería ser de 20 días para el proceso anaerobio; sin embargo, ciertos autores han propuesto para cada ambiente los correspondientes tiempos de retención, que son frecuentes en los biodigestores, como se observa en la Tabla 3, debido a la variación de la temperatura, la cual es complicada manejar. Así mismo, esa variación de temperatura altera el tiempo de retención, el cual cambia dependiendo del factor de corrección, el tipo de reactor y sustrato (Arboleda & González, 2009).

Tabla 3. Tiempo de retención (Tr) según la temperatura.

Temperatura (°C)	Tr (días)
>45	>8
15-35	>20
<15	>100

Nota: Tiempo de retención según las distintas bacterias implicadas que se originan a ciertas temperaturas, Adaptado de (Castillo, 2018).

Concentración de ión hidronio (pH): Los microorganismos metanogénicos están muy expuestos a la alteración de acidez/alcalinidad (pH) en la mezcla del biorreactor. Esta variable debe conservarse en un rango de 7,8 a 8,2 para un desempeño adecuado del proceso. Durante el proceso de digestión se crean ácidos orgánicos, los cuales si no se les tiene el adecuado manejo, acidifican la mezcla del biorreactor, lo que hace que se realice la inhibición de los procesos bacterianos y enzimáticos en el biorreactor (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011).

Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV): Los sólidos totales presentes en la materia orgánica son los residuos obtenidos de la evaporación y secado de la muestra (García & Gómez, 2016). La cantidad de ST presente en la mezcla con la que se cargará el digestor, es un factor fundamental para garantizar que el proceso se lleve a cabo apropiadamente, además, el crecimiento

de las bacterias metanogénicas se ve limitada a la cantidad de los mismos, mientras que los sólidos volátiles se refiere a los sólidos totales que se volatilizan durante el proceso de incineración a 500°C representando la fracción de la materia orgánica degradable (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011)

Debido a que no se cuentan con datos de % ST y % SV de animales exóticos porque no son normalmente usados para producir biogás, se compararon con animales de granja por ser los mamíferos más cercanos con los que se produce biogás actualmente.

Tabla 4. Porcentaje de sólidos totales (ST) en diferentes excrementos sólidos de animales.

Materias primas	%ST
Estiércol bovino	13,4-56,2
Estiércol porcino	15-49
Estiércol avícola	26-92
Estiércol caprino	83-92
Estiércol ovino	32-46

Nota: Rango de sólidos totales de residuos generados por diferentes animales. Adaptado de (*Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011*).

Tabla 5. Porcentaje de sólidos volátiles (SV) en diferentes excrementos sólidos de animales.

Materias primas	%SV
Estiércol bovino	86,8
Estiércol porcino	83,4
Estiércol de pollo	57,8

Nota: Rango de sólidos volátiles de residuos generados por diferentes animales. Adaptado de (*Castillo, 2018*).

7.2 Marco conceptual

Excrementos sólidos: Es la mezcla de materia orgánica excretada por los animales la cual se encuentra en estado de descomposición (Farlex, Inc, 2013), cuya variación depende de factores como la naturaleza del lugar donde habitan, su alimentación y los cuidados que se tienen para conservarlos (Gutierrez, 1995). Son generalmente utilizados para la producción de abonos orgánicos y la producción de biogás como se busca a través de este estudio, lo cual podría ser utilizado finalmente como combustible para la producción de energía.

Biodigestor: Es un digestor de desechos orgánicos, dicho de una forma más simple, es un recipiente sellado, hermético e impermeable (nombrado reactor), en el cual se ingresa material orgánico a fermentar (excrementos de animales) en una cierta cantidad de agua para que mediante la fermentación anaerobia se obtenga gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio y además mediante este se reduzca el porcentaje de contaminantes derivados de los excrementos (Bolívar & Ramírez, 2012).

Partiendo del abastecimiento de dicho sustrato existen tres modos de operación en un biorreactor, que se caracterizan primordialmente por la manera en que el sustrato es suministrado al tanque: modo discontinuo o batch, modo semicontinuo o fed-batch y modo continuo (Universidad Veracruzana, 2019).

Modo discontinuo o batch: El crecimiento de microorganismos en batch consiste en el cultivo de células con determinada concentración inicial, la cual no es alterada por nutrientes adicionales o el lavado, conservando de esta manera el volumen y solo condiciones ambientales del medio como pH, temperatura y velocidad de agitación son controladas por el operador. Dicho proceso culmina cuando todo el sustrato es consumido por la biomasa (Universidad Veracruzana, 2019).

Modo semicontinuo o fed-batch: En este modo de operación hay ingreso continuo o intermitente de sustratos, sin retiro de productos. Dicho en otras palabras, por lotes alimentados con alimentación de entrada; se alimenta una línea de entrada para que el sistema cuente con biomasa con un crecimiento exponencial y aumento de la productividad (Universidad Veracruzana, 2019).

Modo Continuo: Este consta en alimentar nutrientes y apartar productos continuamente de un biorreactor. Con diversas condiciones el cultivo puede lograr un estado estacionario, en el cual no hay alteración con el tiempo del volumen del biorreactor (Universidad Veracruzana, 2019).

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Es un parámetro que calcula la proporción de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos, que hay diluidas o en suspensión en una muestra líquida. Este a su vez se emplea para calcular el grado de contaminación y es expresado en miligramos de oxígeno diatómico por litro ($\text{mg O}_2/\text{l}$). Sin bien este parámetro intenta medir primordialmente la concentración de materia orgánica, tiene interferencias por la aparición de sustancias inorgánicas dispuestas a ser oxidadas (sulfuros, sulfitos, yoduros y otros) que asimismo figuran en la medida (Bolívar & Ramírez, 2012).

Humedad: La medida de agua presente en la biomasa altera de forma directa la energía aprovechable del biocombustible obtenido, la humedad de las muestras señala un porcentaje alto de agua y la probabilidad de poder homogenizar la biomasa y lograr la digestión anaerobia inicia cuando el volumen de agua es bajo (Ramírez, 2016).

Relación carbono/nitrógeno: Son las principales fuentes de nutrientes de las bacterias metanogénicas, es decir, son quimioautótrofas, emplean el carbono como fuente de energía y el nitrógeno es aprovechado para la formación de nuevas células. Estas bacterias absorben 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo cual, la relación óptima de estos elementos en la materia prima se estipula en un rango de 30:1 hasta 20:1 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011).

Fósforo: Es una sal mineral en forma de fosfatos que se encuentra en la materia orgánica la cual es requerida en el proceso anaeróbico para la síntesis de nueva biomasa (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011).

Potasio: Es una sal mineral la cual esta presente en cierto equilibrio en el proceso microbiológico y en muchos casos es utilizado para mantener el pH óptimo en el reactor (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011)

Azufre: El azufre es una sal mineral la cual es tóxica para las bacterias, esta afecta si se encuentra en el biogás porque forma ácido sulfuroso y daña los compuestos metálicos presentes oxidándolos, además las altas concentraciones en el sustrato pueden ocasionar la inhibición del proceso anaerobio particularmente de la metanogénesis (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011).

Biogás como energía alternativa: El biogás es conocido como aquel gas que resulta de la fermentación bacteriana de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este proceso puede llevarse a cabo tanto en medios naturales como en dispositivos específicos para la formación del gas. Este producto esta compuesto por metano, dióxido de carbono y monóxido de carbono, además de otros gases en menor proporción.

El biogás esta constituido principalmente por metano (en un 80% - 92%) generado por la degradación de materia orgánica en atmósfera libre de oxígeno, proceso llamado digestión anaerobia o metanización. Sus características de combustión son asimilables a las del gas natural, logrando incluso una mayor pureza que este.

Para su adquisición, se puede emplear como materia prima la excreta animal, cachaza de la caña de azúcar, residuos de mataderos, fábricas de levadura, pulpa y cáscara de café, así como la materia seca vegetal (Carta, Calero, Colmenar, Castro, & Collado, 2013).

Potencial de biogás: Se refiere al potencial máximo de biogás que contiene un residuo, en este caso los excrementos sólidos. Todos los residuos orgánicos poseen cierto potencial específico, el cual varía dependiendo de las características en cuanto a la composición de cada uno de ellos. La determinación de este potencial se lleva a cabo experimentalmente a escala de laboratorio, biodegradando el material de estudio (excrementos sólidos) en condiciones anaerobias controladas. Dicho biogás debe tener un potencial mínimo del 40% de metano para ser aprovechable energéticamente (Ainia, 2008).

7.3 Marco legal

En cuanto a la normatividad referente a energías alternativas que sustenta esta investigación, Colombia a diferencia de otros países no cuenta con un marco legal amplio referente a este tema, es por ello que en algunas situaciones las energías renovables se rigen con base al manejo de las energías convencionales.

Tabla 6. Normatividad vigente colombiana en relación a las energías renovables.

Norma	Relación con el proyecto
Ley 697 de 2001	Expone el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como una cuestión de beneficio nacional. Además, creó el Programa Nacional de Uso Racional de la Energía (PROURE), en el cual se incentiva a la eficiencia energética y otros diseños de energía no convencionales (2001).
Ley 788 de 2002	Instaura una conexión al impuesto de renta sobre los ingresos obtenidos de la venta de energía eléctrica producida a partir de residuos agrícolas, fuentes eólicas y biomasa. A su vez esta ley, exige el cumplimiento de 2 requisitos: gestionar certificados de emisión de CO ₂ y, que al menos 50,0% de los recursos logrados por la venta de esos certificados se transformen en obras de beneficio social en la región donde trabaja el generador (2002).
Ley 629 de 2009	El País se une al Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997. Este protocolo con el fin de disminuir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), lo que hizo que las energías renovables fuesen una elección estratégica para Colombia (2000).

Tabla 6. Continuación

Ley 1665 de 2013	El país aprueba el “Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena)” hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009 (2013).
Ley 1715 de 2014	Normaliza la combinación de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional (Ley 1715, 2019).
Decreto 2811 de 1974	Mediante la cual se busca la preservación y restauración del ambiente y la conservación, mejorar y utilizar de manera racional los recursos naturales renovables, según juicios de equidad que afirman el progreso conforme del hombre y de dichos recursos (Decreto No.2811, 1974)
Decreto 2981 de 2013 en su artículo 82	Establece los propósitos del aprovechamiento, del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2013), el cual plantea: Racionalizar el uso y consumo de las materias primas derivadas de los recursos naturales, rescatar valores económicos y energéticos que hayan sido empleados en los diversos técnicos productivos, aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios al reducir la cantidad de residuos a disponer finalmente en forma adecuada, reducir el caudal y la carga contaminante de lixiviados en el relleno sanitario principalmente cuando se aprovechan residuos orgánicos. De esta manera, se promueve el uso energético de los residuos de alto contenido orgánico, y la reducción de la cantidad que se deja en rellenos sanitarios (Decreto 2981, 2013).
Resolución 631 de 2015	La cual establece los parámetros y los valores máximos permitidos que deberán desempeñar quienes ejecutan vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público (Resolución No.631, 2017).
Resolución número 1207 de 2014	Instruye las disposiciones afines con el uso del agua residual tratada (Resolución No.1207, 2014).
Norma técnica: NTC. COLOMBIANA. 5167	Establece los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas o acondicionadores de suelo (ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas, 2011).
ISO 11734 de 1995	Establece un método para la evaluación de la biodegradabilidad final de compuestos orgánicos en lodos digeridos a una concentración dada por microorganismos anaerobios (International Standard ISO, 1995).

Nota: Legislación colombiana vigente que regula los estudios relacionados con energías alternativas, pertinente para el desarrollo del presente proyecto. Modificado por Avila.D, 2019.

8. Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos estipulados referente al estudio de factibilidad energética, se realizó esta investigación de tipo exploratoria, analítica y cuantitativa. Para ello, se estructuró la metodología en las siguientes fases (ver Anexo 1):

8.1. Fase 1. Acondicionamiento de los excrementos sólidos para la digestión anaerobia

Esta unidad describe el proceso empleado para la obtención del sustrato acondicionado de la muestra de los excrementos sólidos de los animales terrestres para su utilización en la digestión anaerobia.

8.1.1. Diagnóstico de las áreas de manejo de los animales.

Se procedió a caracterizar el estado y funcionamiento de las áreas aisladas donde se le realizan las actividades de control a los animales, cuidados médicos preventivos, alimentación, limpieza y proceso de recolección de los excrementos generados, así como la indagación en cuanto al número de individuos y sexo de los mismos.

8.1.2. Generación de excrementos sólidos por los animales terrestres.

Se llevó a cabo el pesaje diario de los excrementos generados por los animales en un rango de tiempo de quince días incluyendo fines de semana. Para ello se utilizó una báscula colgante tipo reloj donde fueron pesadas las excretas generadas por cada especie.

8.1.3. Recolección y preparación de los excrementos sólidos.

Las excretas objeto de estudio se recolectaron de un grupo de animales terrestres compuesto por herbívoros, felinos, osos y pequeños mamíferos que habitan en el Bioparque Los Ocarros. Seguido de la recolección, se procedió a la obtención del sustrato a través de la mezcla de los excrementos generados en un día, la cual fue llevada al laboratorio de aguas de la Universidad Santo Tomás - Sede Villavicencio.

8.2. Fase 2. Caracterización de parámetros fisicoquímicos del sustrato

Teniendo la mezcla en el lugar de estudio, se procedió a realizar la caracterización de las excretas por medio de diferentes parámetros, utilizados para caracterizar el sustrato a ser usado en un proceso de producción de biogás (ver Tabla 7). Para ello se utilizó como sustrato la biomasa alimentada (excretas de animales) que intervienen en el proceso de digestión anaerobia y la biomasa activa (inóculo) que es la población bacteriana.

Tabla 7. Parámetros, métodos y equipos que se utilizaron para realizar la caracterización.

Parámetro	Método	N° Método Estándar	Equipos
% Humedad % Sólidos Totales	Gravimétrico	2540B	-Horno -Balanza analítica
% Sólidos Volátiles	Gravimétrico	2540E	-Mufla -Balanza analítica
DQO (Demanda química de Oxígeno)	Espectrofotométri co	5220D	-Termoreactor - Espectrofotómetr o
pH	Electrométrico	4500-H	- Potenciómetro
Carbono (C)	Oxidación	5530	-Relación Empírica
Nitrógeno (N)	Espectrofotométri co	4500-N Org.	-Termoreactor
Fósforo (P)		4500P	- Espectrofotómetr
Azufre (S)		4500S	o

Nota: Metodología empleada para la caracterización del sustrato utilizado. Elaborada a partir de “Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales.” *Adaptado de (American Public Health Association, 1992).*

A través de esta tabla se realizó el proceso de caracterización con el fin de obtener información detallada de este residuo orgánico, debido a que cuenta con características particulares de procedencia, ya que son de animales que tienen una dieta diferente a la de los bovinos y porcinos, usados usualmente para producir biogás.

8.3. Fase 3. Determinación de la tasa específica de producción de biogás y porcentaje de metano

Seguido de realizar la caracterización del sustrato preparado, se procedió a aplicar el método volumétrico (2720 B, Métodos Normalizados) para obtener el porcentaje de biogás y metano generado diariamente por las excretas utilizadas. Para ello se llevó a cabo un montaje con el objetivo de efectuar las pruebas de laboratorio como se muestra en las Figuras 2 y 3, donde se utilizó una cantidad diferente para cada corrida, la cual se disponía en una botella que funcionaba como un reactor tipo batch o también llamado de carga. Una vez agregada la muestra, el gas generado se traslada mediante un tubo hacia dos botellas herméticamente selladas; la primera con NaOH, en la cual se absorbe CO_2 y la segunda con líquido inerte (H_2O) coloreado, el cual es desplazado por el gas metano al envase de medición obteniendo así el volumen del mismo (ver Figura 2).

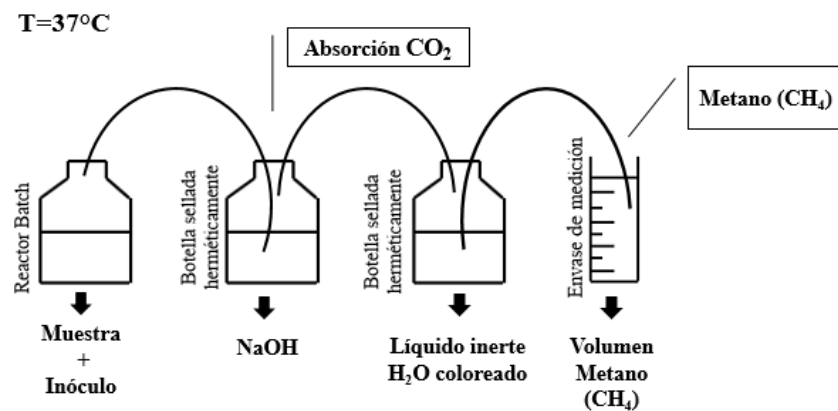


Figura 2. Montaje experimental para la obtención del porcentaje de metano. Por Padilla. L, 2018.

Del mismo modo, para la medición del biogás, se realizó el mismo montaje con la diferencia de que esta no cuenta con la botella que contiene NaOH donde se absorbe el CO_2 , sino que pasa directamente a la botella donde se encuentra el líquido inerte (H_2O) coloreado, midiéndose finalmente el biogás producido en el envase de medición, (ver Figura 3).

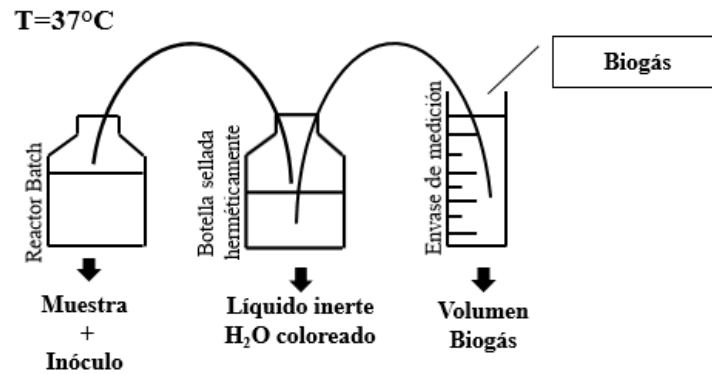


Figura 3. Montaje experimental para obtención de la tasa específica de biogás. Por Avila. D, 2018.

El diseño experimental que se empleó es conocido como 4x1, donde se ejecutaron 4 réplicas y el parámetro a variar fue la cantidad de sustrato agregado (variable independiente), para medir la producción de metano (variable dependiente). Se manejó el mismo tiempo de retención para cada reactor, sin embargo, el experimento se detenía cuando la producción diaria de biogás era igual a 5% de la máxima producción diaria alcanzada.

El manejo estadístico que se le dió a los datos obtenidos fue la determinación de la desviación estándar y varianza del potencial de biogás calculado a partir de las diferentes corridas. Para ello se realizaron 3 corridas, 1 por cada cantidad específica de sustrato. Las pruebas se desarrollaron siguiendo la metodología del “Standard Methods (2720 B)” (American Public Health Association, 1992) y la Norma DIN 38414 “Fermentation of organic materials - Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests” la cual está basada en la Norma VDI 3475 Blatt 4:2010-08 de la Asociación Alemana de Ingenieros (VDI) (Verein Deutscher Ingenieure, 2010), para expresar el potencial de biogás en $\text{m}^3/\text{Ton SV}$ del Sustrato. Esta metodología tiene un error de $\pm 10\%$, por lo que se determinó la desviación estándar para corroborar que la variación de los resultados se encuentre dentro de lo esperado. Por último, se llevaron a cabo aproximadamente 4 repeticiones por sustrato, lo cual incluye 1 botella de control (sin sustrato agregado).

9. Resultados y análisis

A continuación, se presentan los resultados del estudio experimental sobre la factibilidad energética que tiene los excrementos sólidos de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros para producir biogás en un biodigestor a partir de la metodología desarrollada.

9.1. Fase 1. Acondicionamiento de los excrementos sólidos para la digestión anaerobia

9.1.1. Diagnóstico de las áreas de manejo de los animales.

Para llevar a cabo la caracterización de las áreas de manejo, inicialmente se programó con la coordinadora Enid Chacón Saavedra del Bioparque Los Ocarros realizar el ingreso a estos espacios el día 26 de noviembre del 2018. El recorrido se desarrolló en horas de la mañana de 7:00 am a 9:00 am (ver Figura 4), ya que es el momento en que se realiza el aseo diario de las áreas aisladas y de exhibición, así como la recolección de las excretas producidas por los animales durante su estadía allí.



Figura 4. Recorrido que se realizó a las áreas de manejo de los animales objeto de estudio. Por Padilla. L, 2019.

En el trayecto se evidenciaron las siguientes características (ver Tabla 8) acerca del funcionamiento y el estado en que se encontraban estas zonas.

Tabla 8. Diagnóstico de las áreas de manejo.

Especie	Cuidados médicos preventivos	Limpieza	Proceso de recolección de los excrementos generados
Osos	Se lleva a cabo una desparasitación una vez al año (profilaxis) para prevenir parásitos así como una valoración general con el fin de conocer el estado en el que se encuentran.	Se hace un hidrolavado todos los días con agua y jabón a granel, desinfectándolo con hipoclorito de sodio al 3-5 % al final. Además de ello, en la entrada de cada área de manejo se encuentran dos baldes, uno con agua y otro con amonio, donde es necesario lavar las botas antes y después de ingresar a esta área (Figura 5).	Se realiza de forma manual utilizando una escoba y un recogedor para luego almacenarlas en baldes. Caso contrario para Dantas y Chigüiros que se recolectan mediante un colador, puesto que estos defecan en el agua.
Pequeños mamíferos			
Felinos			
Herbívoros			

Nota: Caracterización del estado y funcionamiento de las áreas aisladas. Por Padilla, L, 2019.



Figura 5. Estado en el que se encuentra una de las áreas de manejo donde habitan los animales utilizados para la investigación. Por Padilla, L, 2019.

Partiendo de los resultados de la Tabla 8 se puede analizar que los animales objeto de estudio debido a las condiciones y manejo que se les da a las áreas donde habitan, siendo este un espacio comprendido dentro de ciertos límites, dan lugar a una mayor susceptibilidad de presentar enfermedades (Spada, 2016), lo que trae consigo suministro de medicamentos en repetidas ocasiones, ya que se encuentran en un zoológico donde se lleva un control del estado de salud de cada animal a diferencia de los que se encuentran en su hábitat natural que no son constantemente manipulados, tal es el caso de este estudio, donde la muestra de excretas fue recolectada dos meses después de ser desparasitados.

Así mismo, se procedió a indagar y seleccionar la cantidad de animales terrestres cuyas excretas eran susceptibles para producir biogás (Tabla 9).

Tabla 9. Animales objeto de estudio.

Especie		Cantidad	Sexo	Clasificación según su alimentación	
Osos	Osos anteojos	1	Hembra	Omnívoros	-Galletas (avena, maní). -Frutas (papaya naranja, manzana, banano, sandia, fresa).
		1	Macho		
Pequeños mamíferos	Zorros	2	Hembra		
	Cusumbos	5	Hembra		
	Erizos	1	Hembra		
		1	Macho		
	Tairas	1	Hembra		
		1	Macho		
	Mapaches	1	Hembra		
		1	Macho		
	Grisones	1	Hembra		
		2	Macho		
Ocelote	1	Hembra	Carnívoros	-Carne de res. -Presas vivas (gallina, pato, conejo).	
	1	Macho			
Felinos	Puma	2			Hembra
		1			Macho
	Jaguar	3	Hembra		
		1	Macho		
Herbívoros	Venado coliblanco	6	Hembra	Herbívoros	-Forraje. -Tubérculos (Yuca, mazorca, zanahoria, papa). -Concentrado.
		1	Macho		
	Venado colorado	1	Hembra		
		1	Macho		
	Danta	1	Hembra		
		1	Macho		
Chigüiro	2	Hembra			
	2	Macho			

Nota: Número de individuos, sexo y alimentación de los animales seleccionados. Por Ávila. D, 2019.

Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 9, se observó que al seleccionar la cantidad de animales terrestres cuyas excretas eran susceptibles para producir biogás, la cantidad inicial disminuyó, debido a que algunos no contaban con las condiciones de salud necesarias, es decir, se encontraban en cuarentena y otros por la dificultad de acceder a las heces no se podían recolectar, reduciendo de esta manera la suma de animales objeto de estudio en comparación con el número total de estos.

9.1.2. Generación de excrementos sólidos por los animales terrestres.

En cuanto a la realización del pasaje, en compañía de la coordinadora del Bioparque Los Ocarros se delegó a los encargados del mantenimiento y funcionamiento de las áreas de manejo, llevar a cabo la recolección de las excretas generadas por cada especie seleccionada durante quince días (10 al 24 de septiembre de 2018) incluyendo fines de semana. Del mismo modo, se les indicó depositarlas en diferentes bolsas plásticas y llevarlas a la zona de pesaje de residuos orgánicos, lugar donde se procedió a pesar todos los días a las 11:00 am cada una de las bolsas utilizando una balanza tipo reloj, hora en la cual los responsables de las áreas aisladas terminaban su trabajo de limpieza y por ende recolección de las excretas encontradas en estas zonas. Una vez pesados los excrementos se desechaban en el punto de compostaje y las bolsas resultantes eran llevadas al punto de recolección (Figura 6).



Figura 6. Recolección, pesaje y disposición final de excrementos sólidos durante los quince días de muestreo. Por Ávila. D, 2019.

Como resultado del pesaje diario de las excretas de los animales seleccionados, se obtuvieron las siguientes cantidades (Tabla 10):

Tabla 10. Cantidad de excrementos generados.

Día/ Especies	Peso diario (Kg)				Total producción diaria
	Oso s	Pequeños mamífero s	Felinos	Herbívoros	
10/09/2018	0,7	1,0	1,0	2,0	4,7
11/09/2018	2,0	0,2	-	0,5	2,7
12/09/2018	1,0	2,0	1,5	1,0	5,5
13/09/2018	1,0	0,5	2,0	0,5	4,0
14/09/2018	2,0	1,0	0,5	0,3	3,8
15/09/2018	0,3	1,0	1,0	0,5	2,8
16/09/2018	1,0	1,0	1,0	0,5	3,5
17/09/2018	1,0	1,0	1,0	2,0	5,0
18/09/2018	1,5	0,5	1,4	1,0	4,4
19/09/2018	1,8	1,0	2,2	2,0	7,0
20/09/2018	1,0	-	2,0	0,2	3,2
21/09/2018	1,2	-	2,0	1,0	4,2
22/09/2018	1,0	0,5	1,0	0,5	3,0
23/09/2018	2,0	0,5	1,5	0,3	4,3
24/09/2018	1,5	1,0	2,0	1,0	5,5
Promedio					4,2
Varianza					1,39
Desviación Estándar					1,17

Nota: Pesaje diario, promedio, varianza y desviación estándar de los excrementos generados por los animales durante quince días. Por Padilla. L, 2019.

De acuerdo con los pesajes que se obtuvieron en la Tabla 10, mediante la varianza podemos decir que la producción diaria de excrementos generados por los animales utilizados para este estudio varían en un 33% con respecto a su media (4,2 Kg), esto quiere decir que es relativamente homogénea su producción, lo cual es importante si se llegase a emplear el biodigestor dentro del Bioparque, ya que una producción constante de biogás depende de que se alimente todos los días con excretas. Por otro lado, la desviación estándar indica que hay una tendencia a variar por debajo o por encima de dicho pesaje diario en 1,17 Kg, es decir que se puede asegurar que la cantidad mínima disponible en todo momento sería de cerca de 3 kg/día.

Seguidamente en la Figura 7 se ilustra el total de la producción diaria de excretas por los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros.

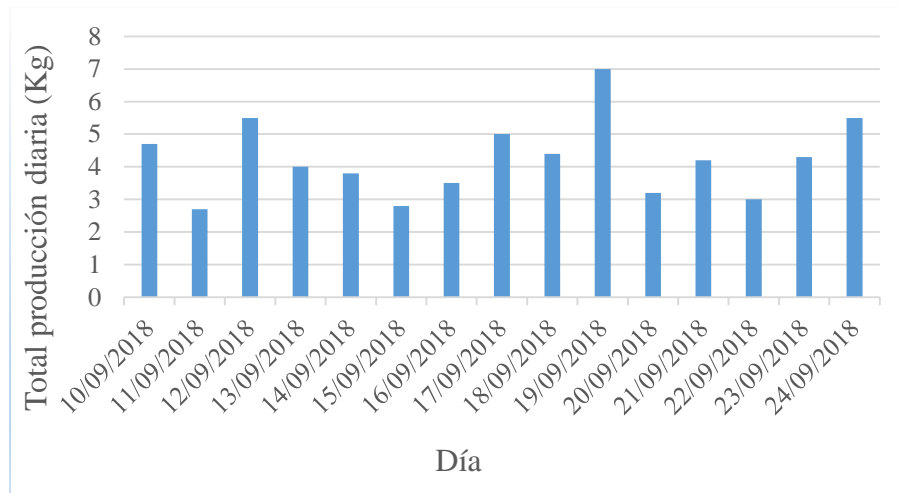


Figura 7. Peso total diario de excrementos que generan los animales objeto de estudio durante los quince días de pesaje. Por Ávila, D, 2019.

De acuerdo a la Figura anterior, se puede observar que el día donde se presentó mayor producción de excretas fue el 19 de septiembre del 2018 con un peso total de 7,0 Kg y con 2,7 Kg el de menor producción correspondiente al día 11 de septiembre del 2018. Es importante resaltar que este cambio en la producción diaria de excretas, varía por diferentes factores, uno de ellos es el relacionado con que los animales no defecan durante el día o lo hagan en estado líquido impidiendo de esta manera su recolección y la otra debido a la ausencia de algún animal por ser trasladado a cuarentena.

Si se considera el valor medio producido de excretas (Tabla 10) se puede diseñar un biodigestor con un volumen de 672 litros, a partir de la Ecuación 1 obtenida de la “Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino” (Campos, 2011). En efecto, al conocer el pesaje de la producción diaria y el volumen del biodigestor, no fue posible separar las excretas por especie, ya que con esta cantidad el prototipo sería muy pequeño comparado con otros biodigestores que cuentan con un volumen de 3827,06 L como es el caso del trabajo de grado sobre el “Estudio de un sistema de energía renovable para la producción de biogás a partir de excretas de ganado porcino para disminuir el consumo de gas doméstico en la hacienda el Márquez del sector de Cunchibamba de la provincia de Tungurahua” en el cual, a partir de 10 animales porcinos se obtienen entre 13,6 a 22,6 Kg diarios de excretas para la alimentación del biodigestor, otro factor que, comparado con la cantidad que producen los animales de Los Ocarros es muy bajo ya que estos generan en promedio 4,2 Kg diarios. Por otra parte, a diferencia de los cerdos de 150 lb utilizados en la hacienda Márquez, los

animales terrestres seleccionados para esta investigación en su mayoría son de tamaño pequeño (Moretta & Jara, 2011).

Ecuación 1. Cálculo del volumen del digestor (Campos, 2011).

$$V_d = (Kg_{(excretas)} + Kg_{(agua)})T_r$$

Donde:

Tr: Tiempo de retención (20 días)

Kg (excretas): Promedio de producción diaria de excretas (4,2 kg)

Kg (agua): Promedio de producción diaria de excretas (4,2 kg) por la relación (1:7)

9.1.3. Recolección y preparación de los excrementos sólidos.

Una vez terminado el pesaje quincenal, se escogió el día 26 de octubre de 2018 para realizar la recolección de las excretas a utilizar en el estudio experimental de producción de biogás (Tabla 11) y el acondicionamiento del sustrato, utilizando una barra para homogenizar las excretas a medida que estas se depositaban en el recipiente de almacenaje (Anexo 2).

Tabla 11. Cantidad de excrementos utilizados para el estudio.

Cantidad de excretas sólidas utilizadas para el estudio experimental					
Especie	Osos	Pequeños mamíferos	Felinos	Herbívoros	Total
Peso (Kg)	1,5	1,0	1,2	0,5	4,2

Nota: Peso de los excrementos sólidos por especie utilizados para realizar el estudio experimental. Por Padilla. L, 2019.

Respecto a las cantidades que muestra la Tabla 11, es importante resaltar que en esta investigación solo se tuvieron en cuenta las excretas generadas en un día, debido a que la coordinación técnica del Bioparque no permitía almacenar las excretas producidas diariamente, por el contrario, se debían depositar en la zona de compostaje una vez fuera pesada cada bolsa.

9.2. Fase 2. Caracterización de parámetros fisicoquímicos del sustrato.

En esta fase se muestran los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica a la biomasa alimentada (excretas de animales) y biomasa activa (inóculo) que se utilizaron (ver Anexo 3) en el proceso de digestión anaerobia (tabla 12).

Tabla 12. Excretas e inóculos empleados en el estudio.

Excrementos sólidos	Excretas de animales terrestres objeto de estudio obtenidas del (Bioparque Los Ocarros)
	Excretas de cerdo obtenidas de la (Unillanos)
Inóculos	Inóculo obtenido del reactor de la (USTA) -Alimentado con cáscara de naranja
	Inóculo obtenido del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve -Alimentado con excretas de cerdo
	Inóculo de un biodigestor ubicado en el Centro Agroecológico La Cosmopolitana -Alimentado con excretas de cerdo

Nota: Inóculos y excretas utilizados para la producción de biogás. Por Ávila D, 2019.

9.2.1. Determinación de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV) en digestión anaerobia.

Para llevar a cabo este parámetro se determinaron mediante la Ecuación 2 y 3 los porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles tanto para las excretas como para los inóculos utilizados durante la investigación (ver Anexo 4), con el fin de evaluar la capacidad de degradación durante el proceso de digestión anaerobia, puesto que la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ven limitadas a medida que aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de biogás (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011).

Ecuación 2. Cálculo de sólidos totales (American Public Health Association, 1992).

$$\text{Sólidos Totales (\%ST)}: \frac{(\text{Peso capsula} + \text{residuo})}{(\text{Peso capsula} + \text{masa húmeda})} * 100$$

Ecuación 3. Cálculo de sólidos volátiles (American Public Health Association, 1992).

$$\text{Sólidos Volátiles (\%SV)}: \frac{[\text{Peso crisol} + \text{masa seca}(105^{\circ}\text{C})] - [\text{Peso crisol} + \text{cenizas}]}{[\text{Peso crisol} + \text{masa seca}(105^{\circ}\text{C})] - [\text{Peso crisol}]}$$

* 100

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de sólidos totales a 150°C, sólidos volátiles a 500°C y humedad que es (100-ST) tanto para las excretas como inóculos utilizados para el proceso de digestión anaerobia:

Tabla 13. Determinación de ST, SV y humedad a excrementos sólidos de animales terrestres objeto de estudio.

Excretas de animales terrestres objeto de estudio (Bioparque Los Ocarros)			
Muestra	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	Humedad (%)
1	48,64	96,43	51,36
2	48,74	96,10	51,26
3	48,45	96,62	51,55
4	48,44	96,68	51,56
5	43,99	97,96	56,01
6	45,09	97,58	54,91
7	45,05	97,57	54,95
8	45,20	96,51	54,8
9	44,76	96,53	55,24
10	44,97	97,31	55,03
11	43,94	97,40	56,06
12	44,97	97,38	55,03
Promedio	46,02	97,00	53,98
Varianza	3,70	0,34	3,70
Desviación estándar	1,92	0,59	1,92

Nota: Resultados sobre el contenido de sólidos totales, sólidos volátiles y humedad que tienen las excretas de los animales seleccionados para este estudio. Por Ávila D, 2019.

De acuerdo a los resultados de la Tabla 13, se puede observar que la varianza de las excretas de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros tanto de sólidos totales como sólidos volátiles se mantiene a pesar de la variabilidad de especies animales, es decir, que las características del sustrato son homogéneas. En cuanto a la desviación estándar indica que ésta es menor 1%, y que no es necesario realizar la caracterización continuamente debido a la homogeneidad de la mezcla.

Del mismo modo, el contenido de sólidos totales que contienen las excretas de los animales terrestres objeto de estudio con (46,02%) comparado con el manual de biogás muestra que se encuentra dentro del rango óptimo (40 a 60%), por consiguiente la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato no se ven limitadas y a su vez la capacidad de descomponer la materia orgánica tampoco. En cuanto a los datos de sólidos volátiles (97,00%), estos constituyen la casi totalidad de los sólidos totales, indicando de este modo que hay un gran porcentaje de materia orgánica que teóricamente es apta para ser transformada en biogás. Además, la humedad

(53,98%) que presentan es óptima la cual permite una buena movilidad de las bacterias dentro del sustrato (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011).

De igual forma se obtuvieron los siguientes resultados de ST, SV y humedad para la excretas de cerdo de la Unillanos.

Tabla 14. Determinación de ST, SV y humedad a excrementos sólidos de cerdo.

Excretas de cerdo (Unillanos)			
Muestra	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	Humedad (%)
1	33,53	62,79	66,47
2	32,44	54,92	67,56
3	33,15	48,64	66,85
4	30,86	61,63	69,14
5	30,94	58,35	69,06
6	26,52	55,49	73,48
7	25,84	56,61	74,2
8	32,23	57,36	67,77
Promedio	30,69	56,97	67,77
Varianza	8,65	19,08	8,71
Desviación estándar	2,94	4,37	2,95

Nota: Resultados sobre el contenido de sólidos totales, sólidos volátiles y humedad que tienen las excretas generadas por los cerdos de la Unillanos. Por Padilla. L, 2019.

Los resultados de la Tabla 14 muestran que la varianza de las excretas de los cerdos de la Unillanos tanto para sólidos totales como para sólidos volátiles es muy variable respecto a su media, es decir que la muestra de excretas que se tomaron para el análisis no es muy confiable, ya sea porque las excretas fueron tomadas de diferentes cerdos, por lo cual es importante realizar mas análisis con este tipo de sustrato para obtener mejores resultados. En cuanto a la desviación estándar indica que hay una tendencia a variar por debajo o por encima para ST de 2,94 y para SV 4,37, es decir que esta alrededor del 10% , por lo tanto no es segura y es necesario realizar la caracterización nuevamente.

También se puede observar en las excretas de los cerdos de la Unillanos que los sólidos totales con (30,69 %) no se encuentran en el rango adecuado según el manual de biogás, sin embargo, no quiere decir que mediante estas excretas no haya producción de biogás, pero si que los microorganismos se van a ver limitados en degradar la materia orgánica, haciendo lento el proceso de digestión. Para el caso de los sólidos volátiles (56,97 %) nos indica que tienen un alto contenido

de compuestos orgánicos, aunque mucho menor al encontrado en los excrementos de animales exóticos. En cuanto al contenido de humedad (67,77 %) presentan un valor adecuado para el proceso de digestión (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011).

A continuación se presentan los sólidos totales, sólidos volátiles y humedad de los inóculos utilizados durante la investigación.

Tabla 15. Determinación de ST, SV y humedad al inóculo del reactor (USTA).

Inóculo reactor (USTA)			
Muestra	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	Humedad (%)
1	1,06	54,62	98,93
2	0,04	48,76	99,95
3	1,07	52,14	98,92
4	1,02	56,71	98,97
Promedio	0,80	53,06	99,19
Varianza	0,25	11,69	0,25
Desviación estándar	0,50	3,42	0,50

Nota: Resultados sobre el contenido de sólidos totales, sólidos volátiles y humedad que tiene el inóculo del reactor (USTA). Por Padilla. L, 2019.

Tabla 16. Determinación de ST, SV y humedad al inóculo del Centro Agroecológico La Cosmopolitana.

Inóculo Centro Agroecológico La Cosmopolitana			
Muestra	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	Humedad (%)
1	35,13	99,84	64,87
2	40,28	99,86	59,72
3	41,41	99,97	58,59
4	39,77	99,87	60,23
5	38,46	99,96	61,54
6	39,57	99,87	60,43
7	37,67	99,93	62,33
Promedio	38,90	99,90	61,10
Varianza	4,22	0,00	4,22
Desviación estándar	2,05	0,05	2,05

Nota: Resultados sobre el contenido de sólidos totales, sólidos volátiles y humedad que tiene el inóculo del Centro Agroecológico La Cosmopolitana. (USTA). Por Ávila D, 2019.

Tabla 17. Determinación de ST,SV y humedad al inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve.

Inóculo reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve			
Muestra	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	Humedad (%)
1	36,10	97,23	63,9
2	40,88	98,14	59,12
3	41,02	98,36	58,98
4	40,63	99,46	59,37
5	39,41	99,80	60,59
6	39,81	99,32	60,19
7	38,05	99,76	61,95
Promedio	39,41	98,87	60,59
Varianza	3,20	0,95	3,20
Desviación estándar	1,79	0,97	1,79

Nota: Resultados sobre el contenido de sólidos totales, sólidos volátiles y humedad que tiene el inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve. (USTA). Por Ávila D, 2019.

Partiendo de los resultados obtenidos en las Tablas 15, 16 y 17 se puede analizar a través de la varianza y la desviación estándar, que las muestras de sólidos totales y sólidos volátiles en los inóculos presentan poca variabilidad en sus datos con respecto a su media.

En cuanto a los sólidos totales obtenidos del inóculo de propiedad del estudiante Felipe Martínez (39,41%) y el de la Cosmopolitana (38,90%) indican que aunque no estén en el rango óptimo como muestra el manual de biogás, su contenido de ST no limita el crecimiento de los microorganismos, lo cual permite que haya capacidad para degradar la materia orgánica. En cuanto a los sólidos volátiles del inóculo de Felipe Martínez (98,87%) y el de la Cosmopolitana (99,90%) nos enseña que hay un alto componente orgánico el cual va a ser transformado en biogás durante el proceso. A diferencia del inóculo obtenido del reactor de la USTA que su contenido de sólidos totales fue muy bajo (0,80%) indicando de este modo que los microorganismos no se pueden adaptar al sustrato y por consiguiente degradar de manera efectiva la materia orgánica, a su vez la humedad que esta biomasa activa presenta es muy alta (99,19%) por lo que nos da una idea del contenido de agua aprovechable en la hidrólisis, uno de los elementos limitantes del proceso.

9.2.2. Determinación de S, N, C, P.

Este apartado muestra la caracterización de los parámetros S, N, C, P para las excretas objeto de estudio (ver Tablas 18 y 19) y los inóculos (ver Tablas 20 y 21) utilizados durante la investigación. Es importante determinar la presencia de estos compuestos, ya que es necesario para el metabolismo de las bacterias anaerobias (ver Anexo 5).

Tabla 18. Determinación de S, N, C, P a excrementos sólidos de animales terrestres objeto de estudio.

Excretas de animales terrestres (Bioparque Los Ocarros)			
Parámetro	Muestra 1 (mg/L)	Muestra 2 (mg/L)	Promedio (mg/L)
Carbono (C)	0,52	-	-
Nitrógeno Total (N)	20666,4	26000	23333,2
Nitratos (NO₃⁻)	28051,2	28363,2	28207,2
Nitritos (NO₂⁻)	40	48	44
Fósforo (P)	992	879,2	935,6
Azufre (S)	42148	42073,6	42110,8
C/N	0,0000222	-	-

Nota: Caracterización fisicoquímica de las excretas generadas por los animales terrestres objeto de estudio del Bioparque Los Ocarros. Por Padilla. L, 2019.

De acuerdo a los resultados de la Tabla 18 se observa que los compuestos para el metabolismo de las bacterias están presentes. Específicamente, relacionado al carbono y el nitrógeno, los cuales son las fuentes principales de alimentación en las bacterias metanogénicas, su relación (C/N) no se encuentra dentro de lo establecido según el manual de biogás, por lo que podría afectar la multiplicidad y desarrollo de las bacterias. En el caso de las concentraciones de azufre, este tipo de excretas presenta un valor alto (42110,8 mg/L) lo cual es un factor importante porque contribuye a la formación de las bacterias sulfatoreductoras las cuales inhiben el proceso de digestión anaerobia (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011).

Tabla 19. Determinación de S, N, C, P a excretas de cerdo.

Excretas de cerdo (Unillanos)			
Parámetro	Muestra 1 (mg/L)	Muestra 2 (mg/L)	Promedio (mg/L)
Nitrógeno Total (N)	20000	19332,8	19666,4
Nitratos (NO₃⁻)	45,974	40,389	43,181
Nitritos (NO₂⁻)	72	64	68
Fósforo (P)	1554,4	1461,6	1508
Azufre (S)	36814,4	37480,8	37147,6

Nota: Caracterización fisicoquímica de las excretas obtenidas por los cerdos de la Unillanos. Por Ávila D, 2019.

En cuanto a los resultados de las excretas de los cerdos de la Unillanos se observa que la concentración de nitrógeno total es alta (19666,4 mg/L) afectando de esta manera la estabilización de las bacterias en el proceso y el crecimiento microbiano al liberarse y acumularse en forma de

amonio caracterizado por ser tóxico e inhibidor del proceso. Del mismo modo se resalta que, en estas excretas de cerdo las concentraciones de azufre (37147,6 mg/L) son elevadas, reduciendo de esta manera el proceso digestivo y por lo tanto la producción de biogás (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011).

Partiendo de los resultados de la caracterización vistos en las Tablas 18 y 19 para las excretas de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros y las excretas de cerdos de la Unillanos es importante resaltar que el rango de los compuestos cuando no coinciden con el manual establecido no quiere decir que no va a generar ningún resultado, como el caso del contenido de nitrógeno de las excretas de cerdos y las del Bioparque Los Ocarros el cual fue alto, en relación a ello es de aclarar que si es un factor de inhibición pero no del mismo grado como lo es un antibiótico el cual si inhibe los microorganismos (Panseri, y otros, 2013), por ello es propio destacar que a pesar de que no hayan buenas concentraciones en los diferentes compuestos, las bacterias tienen grandes características y una de ellas es adaptarse a los cambios que se le presenten (Constanza, Antolinez, Bohórquez, & Corredor, 2015).

En seguida se presenta la caracterización de S, N, C, P para los inóculos utilizados durante la investigación.

Tabla 20. Determinación de S, N, C, P a inóculo de la Cosmopolitana.

Inóculo Centro Agroecológico La Cosmopolitana			
Parámetro	Muestra 1 (mg/L)	Muestra 2 (mg/L)	Promedio (mg/L)
Carbono (C)	0,00154	-	-
Nitrógeno Total (N)	56499,9	52249,8	54374,85
Nitratos(NO₃⁻)	61,03	-	61,03
Nitritos(NO₂⁻)	120	-	120
Fósforo (P)	25,58	-	25,58
Azufre (S)	570,37	-	570,37
C/N	0,0000000284	-	-

Nota: Caracterización fisicoquímica del inóculo obtenido del Centro Agroecológico La Cosmopolitana. Por Padilla. L, 2019.

Tabla 21. Determinación de S, N, C, P al inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve.

Inóculo reactor de propiedad del estudiantes Diego Felipe Martínez Monsalve			
Parámetro	Muestra 1 (mg/L)	Muestra 2 (mg/L)	Promedio (mg/L)
Carbono (C)	0,039	-	-
Nitrógeno Total (N)	5833,3	333,3	3083,3
Nitratos(NO₃⁻)	293,5	324,67	309,085
Nitritos(NO₂⁻)	0,7	0,8	0,75
Fósforo (P)	13,02	13,97	13,495
Azufre (S)	9851,8	10407,4	10129,6
C/N	0,0000126	-	-

Nota: Caracterización fisicoquímica del inóculo obtenido por el reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve. Por Padilla. L, 2019.

Teniendo en cuenta los resultados de las Tablas 20 y 21, se observa que la relación C/N tanto para el inóculo obtenido del reactor de Felipe Martínez como el de la Cosmopolitana presentan valores que no se encuentran dentro de lo establecido por el manual de biogás. Por otro lado, el nivel de azufre que presentó el inóculo de la Cosmopolitana es bajo (570,37mg/L), comparado con el inóculo del reactor de Felipe Martínez (10129,6 mg/L) el cual fue mucho mayor, por lo que se reduce en el inóculo de la Cosmopolitana el riesgo de la generación de bacterias sulfatoreductoras que son las responsables de inhibir la producción de biogás (Solano, 2018).

En relación a lo anterior se conoce que la biomasa activa empleada en el estudio no contaban con las mejores características según la literatura durante el proceso de digestión, lo cual indica que la producción mediante estos tendrá gran variabilidad (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011).

9.2.3. Determinación de pH.

El pH se tomó para las diferentes muestras objeto de estudio, teniendo en cuenta que este es un parámetro significativo puesto que los microorganismos metanogénicos son altamente susceptibles a los cambios de pH comparado con los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica, por ello, si llegase a estar fuera del rango óptimo es importante controlarlo para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente. Dicho control no fue necesario realizarlo porque el pH de las muestras se mantuvieron debido a que no hubo reacción, conservando así un

pH superior a 5,5. Además, en el caso de las excretas porcinas ellas autorregulan el pH por su alto contenido de amoníaco (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011). A continuación, se presentan en la Tabla 22 los valores de pH obtenidos a las muestras de excretas e inóculos utilizados en el presente estudio.

Tabla 22. *Determinación de pH a muestras de estudio.*

Muestras	pH
Excrementos sólidos de animales terrestres (Los Ocarros)	7,5
Excrementos sólidos de cerdos (Unillanos)	8,0
Inóculo biodigestor (USTA)	5,5
Inóculo reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve	7,8
Inóculo de Centro Agroecológico La Cosmopolitana	8,0

Nota: Resultados de pH a excrementos e inóculos utilizados para la digestión anaerobia. Por Avila. D, 2019.

Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 22, se puede establecer que el crecimiento bacteriano para las excretas (Unillanos), inóculo de Felipe Martínez y el inóculo de la Cosmopolitana se encontraban en condiciones normales, ya que estaban en un rango de 7,8 - 8,2 aproximadamente en las muestras analizadas, siendo estos valores las condiciones óptimas según el manual de biogás (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011). Del mismo modo, se observa que el pH de las excretas de Los Ocarros no presenta un valor que se encuentre dentro de lo establecido, sin embargo, no muestra un efecto ácido como el inóculo de la USTA el cual se encuentra en un rango entre 5,0-6,5, lo que indica que probablemente haya inhibición de bacterias y se vea afectada la producción de biogás debido a la acidificación del mismo (Solano, 2018).

Por otra parte, cada vez que se realizó un montaje se determinaba el pH inicial y final de las mezclas inóculo:sustrato (ver Tabla 23) con el fin de observar el comportamiento durante el tiempo de corrida para la digestión anaerobia.

Tabla 23. Determinación de pH en mezclas inóculo:sustrato.

Montaje	Relación	Inóculo-Sustrato	pH inicial	pH final
1	1:7	Excretas de Los Ocarros - Inóculo USTA	6,0	5,8
2	1:7	Excretas de Los Ocarros - Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve	7,2	7,3
		Excretas de Los Ocarros - Inóculo de la Cosmopolitana	7,0	7,2
3	1:3	Excretas de Los Ocarros - Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve	7,5	7,5
		Excretas de Los Ocarros - Inóculo de la Cosmopolitana	7,2	7,3
4	1:7	Excretas de Los Ocarros - Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve	7,5	7,7
		Excretas de Los Ocarros - Inóculo de la Cosmopolitana	7,0	7,3
		Excretas (Unillanos) - Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve	8,3	8,0
		Excretas (Unillanos) - Inóculo de la Cosmopolitana	8,0	7,5
5	1:10	Excretas de Los Ocarros - Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve	7,0	6,8
		Excretas de Los Ocarros - Inóculo de la Cosmopolitana	7,2	7,0
		Excretas (Unillanos) – Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve	8,0	7,6
		Excretas (Unillanos) - Inóculo de la Cosmopolitana	7,8	7,5

Nota: Resultados de pH inicial y final de las mezclas inóculo:sustrato realizadas en la presente investigación. Por Avila. D, 2019.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 23, se puede observar que en los dos últimos montajes donde se emplearon las excretas de cerdo de la Unillanos, mezcladas tanto con el inóculo de la Cosmopolitana como con el de Felipe Martínez presentaron valores de pH óptimos, con mayor viabilidad para que se de la digestión anaerobia. A su vez, en el pH de estas mezclas se presentó un descenso, el cual indica que hubo digestión y que no hay suficiente alcalinidad en el digestor, por lo que el pH tiende a disminuir rápidamente, a causa de la producción de ácidos en la acidogénesis, lo que puede crear inestabilidad temporal en el proceso (Ramos Suárez, 2014). Esto

ocurrió, a diferencia de las mezclas que contenían excretas de animales del Bioparque Los Ocarros con inóculo tanto de la USTA, Cosmopolitana y de Felipe Martínez donde el pH se sostuvo durante el tiempo de corrida, lo que indica gran posibilidad de no haber ocurrido proceso de digestión.

9.2.4. Determinación de DQO.

En esta unidad se muestran los resultados adquiridos de la DQO en las excretas objeto de estudio y en los inóculos utilizados durante la investigación para la digestión anaerobia.

Tabla 24. DQO en excretas del Bioparque Los Ocarros.

Muestra	DQO en excretas de animales terrestres (Bioparque Los Ocarros) (mg/L)	Relación DQO/SV (mg/SV)
1	93976	0,97
2	121192	1,25
3	130272	1,34
4	104344	1,08
Promedio	112446	1,16

Nota: Resultados de DQO en las excretas y su relación con respecto a sólidos volátiles.. Por Ávila. D, 2019.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 24, es posible observar la DQO que hay en las muestras analizadas. Partiendo de ello, se evidencia de las muestras de excretas de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros su relación DQO/SV (1,16 mg O₂/mg SV). Este valor depende de la constitución de la materia orgánica, para sustratos con alto contenido de carbohidratos es cercano a 1,0 mg O₂/mg SV y de 2,6 mg O₂/mg SV para sustratos con alto contenido de grasas (Rojas, 2014). Este valor nos indica que a pesar de que no se realizó un análisis del sustrato en cuanto al porcentaje de contenido de proteínas, lípidos y carbohidratos, éstos últimos constituyen la mayor parte de la materia orgánica. Esto es consecuente con el tipo de alimentación de los animales, ya que a excepción de los carnívoros, los demás animales eran alimentados con especies vegetales y frutales.

Tabla 25. DQO en inóculo de la Cosmopolitana.

Muestra	DQO en Inóculo del Centro Agroecológico La Cosmopolitana (mg/L)	Relación DQO/SV (mg/SV)
1	243,04	0,0024
2	372,66	0,0037
3	388,87	0,0039
Promedio	334,856667	0,0034

Nota: Resultados de DQO en inóculo de la Cosmopolitana y su relación con respecto a sólidos volátiles. Por Ávila. D, 2019.

Tabla 26. DQO en inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve.

Muestra	DQO en Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve (mg/L)	Relación DQO/SV (mg/SV)
1	6724,245	0,068
2	10369	0,105
3	8546,6225	0,086
Promedio	8546,6225	0,086

Nota: Resultados de DQO en inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve y su relación con respecto a sólidos volátiles. Por Ávila. D, 2019.

De igual forma, los resultados de las Tablas 25 y 26 muestran que los valores de DQO/SV que tienen el inóculo de la Cosmopolitana y de Martínez se encuentran con una relación de DQO/SV baja (Rojas, 2014). Por lo que indica que la concentración de microorganismos también lo es, lo que puede influenciar el proceso de digestión.

9.3. Fase 3. Determinación de la tasa específica de producción de biogás y porcentaje de metano.

En esta sección se describen los diferentes montajes que se realizaron para determinar el potencial de biogás y porcentaje de metano. Para ello, se llevaron a cabo 5 montajes experimentales con diferentes relaciones, inóculos y excretas de distinta procedencia como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27. Relaciones, inóculos y excretas empleadas para cada montaje.

Montaje	Relación	Excretas	Inóculo
1	1:7	Excrementos sólidos de animales terrestres (Los Ocarros)	Inóculo biodigestor (USTA)
2	1:7	Excrementos sólidos de animales terrestres (Los Ocarros)	Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve Inóculo Cosmopolitana
3	1:3	Excrementos sólidos de animales terrestres (Los Ocarros)	Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve Inóculo Cosmopolitana
4	1:7	Excrementos sólidos de animales terrestres (Los Ocarros)	Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve Inóculo Cosmopolitana
		Excrementos sólidos de cerdos (Unillanos)	
5	1:10	Excrementos sólidos de animales terrestres (Los Ocarros)	Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve Inóculo Cosmopolitana
		Excrementos sólidos de cerdos (Unillanos)	

Nota: Número de montajes, relaciones, inóculos y excretas utilizados para la producción de biogás y porcentaje de metano. Por Padilla. L, 2019.

El primer montaje se realizó con base al diseño experimental 4x1 (ver Tabla 28), donde se preparó una solución de excretas con la relación 1:7 utilizando los excrementos sólidos de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros objeto de estudio (Figura 8). Este sustrato fue mezclado con el inóculo obtenido del reactor de la universidad Santo Tomás- Sede Villavicencio, alimentado con cáscara de naranja. Una vez terminado el montaje, se procedió a tomar el pH de la mezcla para luego ser transportado a la incubadora ubicada en el laboratorio de microbiología con el fin de que el proceso de digestión anaerobia se desarrollara a una temperatura de 37°C, óptima para el desarrollo de las bacterias degradadoras de materia orgánica. Seguidamente, se empezó a medir la producción de biogás todos los días a la misma hora (11:00 am) por los siguientes 20 días de la corrida junto con la medición del pH a la mezcla antes de desmontarlo, dando como resultado de dichas mediciones 0 producción de biogás y porcentaje de metano.

Tabla 28. Montaje experimental 4x1.

Montaje experimental 4x1– Reactores tipo batch – Gas metano			
	Botella n° 1 (700 ml)	Botella n° 2 (700 ml)	Botella n° 3 (700 ml)
Reactor de control gas metano	Inóculo (200ml)	Agua destilada (500ml) + Hidróxido de sodio	Agua destilada (500ml) + Azul de metileno
Reactor 1	Inóculo (200ml) + Excretas (200ml)	Agua destilada (500ml) + Hidróxido de sodio	Agua destilada (500ml) + Azul de metileno
Reactor 2	Inóculo (200ml) + Excretas (200ml)	Agua destilada (500ml) + Hidróxido de sodio	Agua destilada (500ml) + Azul de metileno
Montaje experimental – Reactores tipo batch – Biogás			
	Botella n° 1 (700 ml)	Botella n° 2 (700 ml)	
Reactor de control biogás	Inóculo (200ml)	Agua destilada (500ml) + Azul de metileno	
Reactor 3	Inóculo (200ml) + Excretas (200ml)	Agua destilada (500ml) + Azul de metileno	
Reactor 4	Inóculo (200ml) + Excretas (200ml)	Agua destilada (500ml) + Azul de metileno	

Nota: Montaje que se empleó para la obtención de biogás y metano. Por Padilla. L, 2019.



Figura 8. Montaje experimental realizado para la obtención de biogás y metano. Por Ávila D, 2019.

Partiendo de los resultados observados en la primera corrida, se optó por realizar dos montajes al tiempo siguiendo el mismo diseño experimental 4x1, relación (1:7) y tipo de excretas (Bioparque Los Ocarros), pero con un inóculo diferente para cada montaje, uno obtenido del reactor de Martínez y el otro del Centro Agroecológico La Cosmopolitana, ambos provenientes de biodigestores alimentados con excretas de cerdo. Estos montajes se ejecutaron con el fin de experimentar otras biomásas activas para corroborar si las fallas persistentes eran del montaje (fugas, posición de mangueras) o por las características del inóculo. Al culminar el tiempo de

retención de los dos montajes, se presentaron nuevamente resultados con 0 producción de biogás y porcentaje de metano.

Posteriormente, al observar que seguía arrojando el mismo resultado, se tomó la decisión de repetir los dos montajes anteriormente nombrados, cambiando esta vez la relación a 1:3, con el fin de aumentar la cantidad de excretas a degradar y así finalmente poder llegar a obtener resultados en cuanto a producción tanto de biogás como de metano. A pesar de ello, los resultados no fueron positivos, por lo que se decidió emplear dos montajes paralelos a escala piloto (ver Figura 14 del Anexo 5), utilizando además de las excretas objeto de estudio, excretas de distinta procedencia (Excretas porcinas de la Unillanos) en ambas pruebas. En un montaje se manejó una relación de 1:7 y en el otro una de 1:10 con los mismos inóculos (reactor Felipe Martínez y Cosmopolitana), incrementando la cantidad en ambas pruebas a la hora de realizar la mezcla con las excretas utilizadas (Bioparque Los Ocarros y excretas porcinas de la Unillanos) incluidas en cada montaje, esto con el objetivo de aumentar la cantidad de bacterias. Al mismo tiempo las excretas sirvieron como control para confirmar si existía inhibición en el proceso de digestión a causa del sustrato alimentado y no el inóculo. Los resultados confirmaron una inhibición con las excretas exóticas utilizadas, ya que se presentó producción de biogás con las excretas de cerdo de la Unillanos manejadas.

Finalmente, para comprobar que los resultados obtenidos sobre la factibilidad energética que tienen las excretas de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros para producir biogás no se debían a la falta de agitación durante el proceso, se procedió a alimentar un biorreactor en modo semicontinuo con agitación durante 15 días con las excretas de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros utilizando una relación 1:7. Este reactor desarrollado por Felipe Martínez, 2019, está ubicado en el Laboratorio de Conversión de Energía de la Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio, como se muestra en la Figura 9. Este reactor, el cual era anteriormente alimentado con excretas de cerdo (con una producción estable de biogás), fue utilizado para investigar si el constante movimiento influiría en los resultados de producción de biogás de este sustrato.



Figura 9. Alimentación reactor propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve tipo Fed – Batch, ubicado en el laboratorio de conversión de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio. Por Padilla L, 2019.

Para corroborar dicha estrategia, se realizaron mediciones cada 3 horas durante los últimos 5 días consecutivos en los que este era alimentado, obteniendo también como resultado final 0 producción de biogás (Figura 10), llegando a la conclusión de que las excretas presentaban sustancias inhibitoras, es decir, en su estado actual no eran factibles para producir biogás.



Figura 10. Medición de producción de biogás cada 3 horas en reactor de Martínez tipo Fed – Batch. Por Padilla L, 2019.

Como resultado de los dos últimos montajes, se obtuvieron volúmenes diarios de producción de biogás normalizados junto con la suma acumulativa de los mismos por medio de la Ecuación 4 dada por el manual alemán de ingeniería, el cual se basa en una medición volumétrica estandarizada en la metodología (American Public Health Association, 1992).

Ecuación 4. Cálculo del volumen de biogás obtenido (Verein Deutscher Ingenieure, 2010)

$$V_0 = V_1 * \left(\frac{((P_1 - P_w) * T_0)}{(P_0 * T_1)} \right)$$

Donde:

V₀: Volumen de biogás normalizado (ml)

V₁: Volumen de biogás medido a temperatura T₁ y presión P₁

P₁: Presión a la que se midió el biogás (mbar)

P_w: Presión de vapor del agua a la temperatura T₁ (mbar)

T₁: Temperatura a la que se midió el biogás (K)

P₀: Presión normal (1013,25 mbar)

T₀: Temperatura normal (273,15 K)

A continuación, se presenta en la Tabla 29 los resultados y comportamiento (Figuras 11 y 12) respectivamente de los datos diarios normalizados y suma acumulativa de producción de biogás del montaje con excrementos de cerdo, utilizando el inóculo del reactor de Martínez y del Centro Agroecológico La Cosmopolitana con una relación 1:7.

Tabla 29. Datos de la producción diaria de biogás normalizados y su acumulativo.

Producción de biogás				
Días de medición	Datos diarios normalizados ml/grSV		Datos acumulados normalizados ml/grSV	
	Excretas de cerdo –Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve	Excretas de cerdo- Inóculo de la Cosmopolitana	Excretas de cerdo –Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve	Excretas de cerdo- Inóculo de la Cosmopolitana
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0,76	0	0,75
4	0,95	1,52	0,94	2,27
5	0	1,97	0,94	4,24
6	0	0	0,94	4,24
7	0	1,58	0,94	5,82
8	0	1,33	0,94	7,14
9	0	2,94	0,94	10,09
10	0	3,42	0,94	13,51

Tabla 29. Continuación

11	0	1,71	0,94	15,21
12	0	2,43	0,94	17,64
13	0	0	0,94	17,64
14	0	1,80	0,94	19,45
15	0	1,14	0,94	20,59
16	0	1,29	0,94	21,88
17	0	0,84	0,94	22,71
18	0	1,01	0,94	23,72
19	0	0,53	0,94	24,25
20	0	0	0,94	24,25
21	0	0	0,94	24,25
22	0	0	0,94	24,25
23	0	0	0,94	24,25

Nota: Medición diaria de biogás de los excrementos de cerdo de la Unillanos con inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve y de la Cosmopolitana a una relación 1:7. Por Padilla. L, 2019.

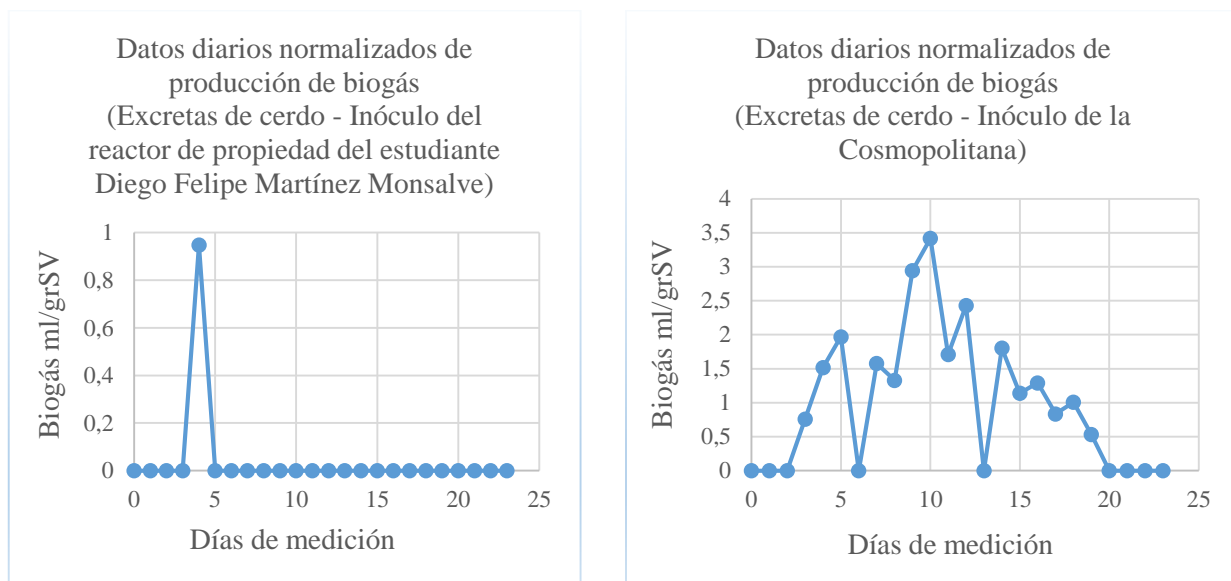


Figura 11. Comportamiento diario de la producción de biogás utilizando una relación 1:7 en excretas de cerdo Unillanos con inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve y de la Cosmopolitana. Por Ávila D, 2019.

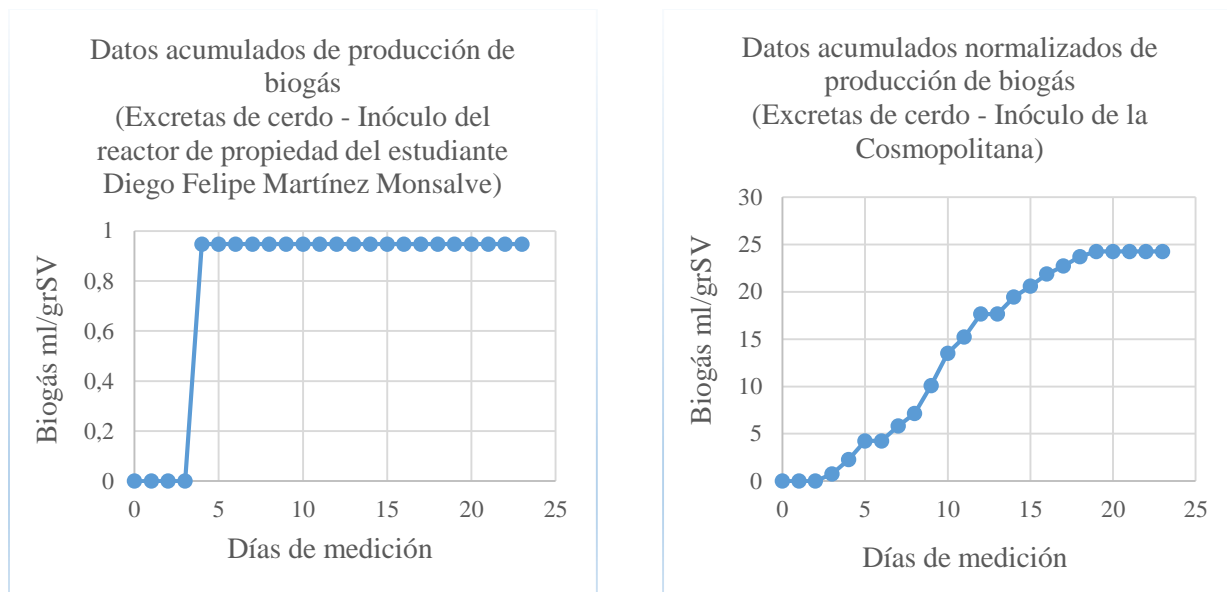


Figura 12. Comportamiento acumulativo de la producción de biogás utilizando una relación 1:7 en excretas de cerdo Unillanos con inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve y de la Cosmopolitana. Por Ávila D, 2019.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las figuras anteriormente presentadas, es posible analizar cómo se va degradando la materia orgánica a lo largo del proceso de digestión (ver Figura 11), notándose un comportamiento favorable en el inóculo del Centro Agroecológico La Cosmopolitana en comparación con el de Felipe Martínez, ya que este sólo produjo biogás al cuarto día de haberse realizado el montaje, mientras que el de la Cosmopolitana produjo quince días durante el proceso de experimentación (22 días). Así mismo, en la Figura 12 se observa el potencial de biogás logrado, que se encuentra representado por el valor acumulado final con 0,94 ml/grSV para las excretas de cerdo e inóculo de Martínez y con un mayor resultado el inóculo de la Cosmopolitana con 24,25 ml/grSV.

Del mismo modo, se presenta en la Tabla 30 los resultados y comportamiento (Figuras 13 y 14) respectivamente de los datos diarios normalizados y suma acumulativa de producción de biogás del montaje con excrementos de cerdo, utilizando el inóculo del reactor de Felipe Martínez y del Centro Agroecológico La Cosmopolitana a una relación 1:10.

Tabla 30. Datos de la producción diaria de biogás normalizados y su acumulativo.

Producción de biogás				
Días de medición	Datos diarios normalizados ml/grSV		Datos acumulados normalizados ml/grSV	
	Excretas de cerdo –Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve	Excretas de cerdo –Inóculo de la Cosmopolitana	Excretas de cerdo –Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve	Excretas de cerdo –Inóculo de la Cosmopolitana
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	2,49	0	2,49
4	6,00	0	6,00	2,49
5	0	0	6,00	2,49
6	0	0	6,00	2,49
7	0	0	6,00	2,49
8	2,61	0	8,62	2,49
9	0	0	8,62	2,49
10	2,61	0	11,23	2,49
11	0	0	11,23	2,49
12	0	0	11,23	2,49
13	0	0	11,23	2,49
14	2,49	0	13,71	2,49
15	0	0	13,71	2,49
16	0	0	13,71	2,49
17	0	0	13,71	2,49
18	0	0	13,71	2,49
19	1,04	0	14,76	2,49
20	0	0	14,76	2,49
21	1,31	0	16,07	2,49
22	0	0	16,07	2,49
23	0	0	16,07	2,49

Nota : Medición diaria de biogás de los excrementos de cerdo de la Unillanos con inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve y de la Cosmopolitana a una relación 1:10. Por Padilla. L, 2019.

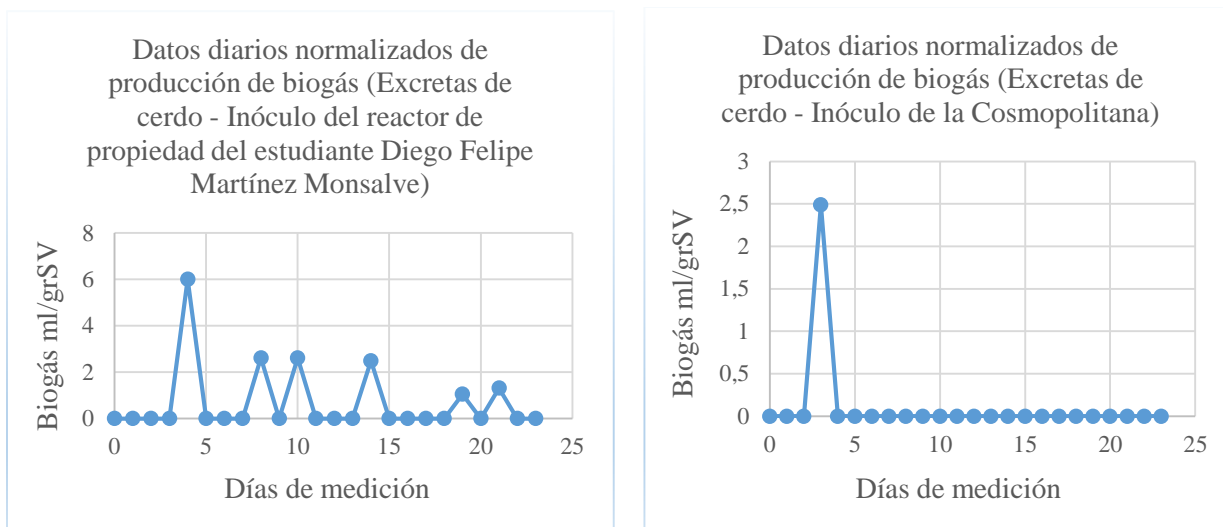


Figura 13. Comportamiento diario de la producción de biogás utilizando una relación 1:10 en excretas de cerdo Unillanos con inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve y de la Cosmopolitana. Por Ávila D, 2019.

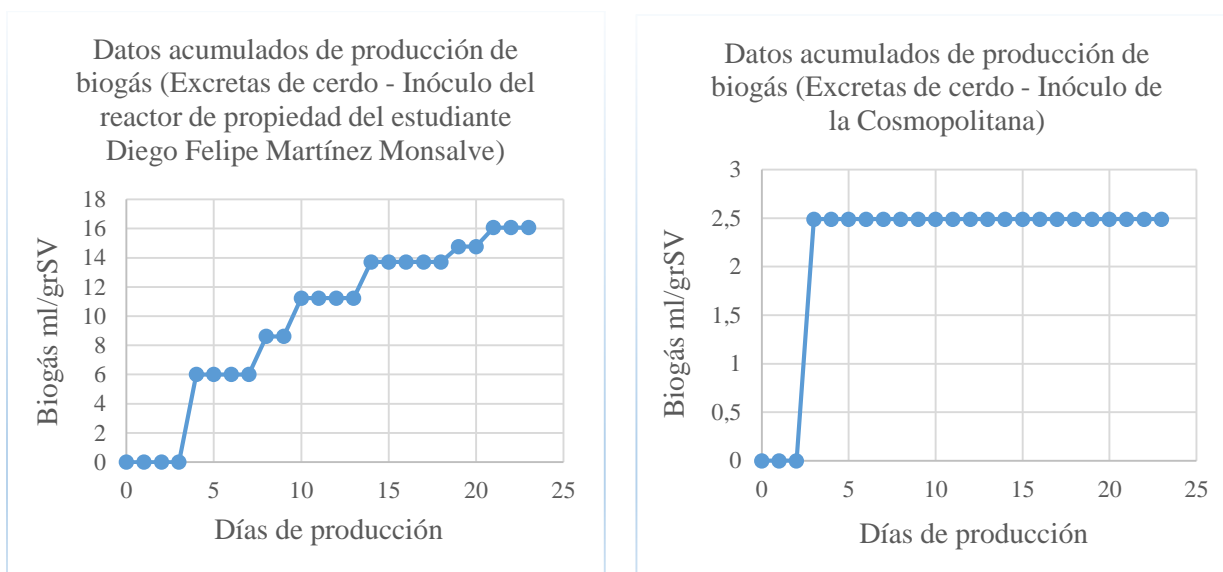


Figura 14. Comportamiento acumulativo de la producción de biogás utilizando una relación 1:10 en excretas de cerdo Unillanos con inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve y de la Cosmopolitana. Por Padilla. L, 2019.

En la Figura 13, se puede notar un comportamiento contrario al ocurrido con el montaje 4, puesto que se evidencia que en este caso con el inóculo que mayor producción de biogás se generó fue con el del reactor de Felipe Martínez, corroborando al final que este si contaba con las características necesarias para hacerlo con seis días de producción aleatoriamente en toda la duración del proceso (23 días), mientras que el de la Cosmopolitana sólo generó al tercer día de su montaje. Del mismo modo, en la Figura 14, se puede observar el potencial de biogás logrado, que

se encuentra representado por el valor acumulado final con 2,49 (ml/grSV) para las excretas de cerdo e inóculo de la Cosmopolitana y con un mayor resultado el inóculo del reactor de Martínez con 16,07 (ml/grSV).

Considerando los resultados obtenidos de las Tablas (29 y 30) y Figuras (11-12 y 13-14) anteriormente presentadas y analizadas, se puede confirmar que en definitiva, los experimentos realizados con las excretas de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros, objeto de estudio, para producir biogás no son factibles para la producción de biogás. Se puede inferir que esto no fue causado por fallas experimentales, calidad del inóculo o efecto de la agitación. Si bien se presentaron estos valores de nitrógeno y azufre, éstos no impiden una producción de biogás, ya que el sustrato de control (excretas porcinas) presentó valores similares y aún así se evidenció producción de biogás. Debido a la ausencia total de la producción de biogás al añadir las excretas exóticas, y debido a su naturaleza es probable que la presencia de fármacos, antibióticos y cualquier otra sustancia química que les suministran de control o por algún tipo de enfermedad que les da a los animales como resultado de las condiciones en las que estos habitan, hayan causado un efecto inhibitorio de la microbiota presente en el inóculo. Esto ha ocurrido en otros estudios, tal como se comprobó en un estudio realizado en la Universidad de Milán titulado “Efectos de antibióticos veterinarios en la producción de biogás” donde se llegó a la conclusión de que los antibióticos dependiendo de su tipo, afectan variablemente la digestión anaeróbica del estiércol de animal, persistiendo en algunos de ellos hasta un 80% de su concentración inicial finalizado el proceso, reduciendo de esta manera la producción de biogás (Panseri, y otros, 2013). La recolección de las excretas se realizó 2 meses después de un proceso de desparasitación, por lo que es posible que haya sido por esta causa. Para confirmar esta hipótesis sería necesario realizar experimentos de digestión con cada una de las sustancias suministradas a los animales y en diferentes concentraciones.

Otro factor inhibitorio podría ser el ocasionado por la presencia de agentes como metales pesados y compuestos químicos empleados diariamente durante la limpieza de las celdas de confinamiento de los animales, lugar donde se llevaba a cabo la recolección de las muestras, así como las altas concentraciones de ácidos volátiles, de nitrógeno y amoníaco por la influencia negativa que tienen sobre los organismos metanogénicos (Velásquez, y otros, 2018).

Por otra parte, para calcular finalmente el potencial de biogás de las excretas de cerdo de la Unillanos utilizando el inóculo de Martínez y del Centro Agroecológico La Cosmopolitana con

las relaciones 1:7 (montaje 4) y 1:10 (montaje 5) durante el tiempo experimental, se aplicó la Ecuación 5 dada por el manual alemán de ingeniería (Verein Deutscher Ingenieure, 2010), el cual se basa en una medición volumétrica estandarizada en la metodología (American Public Health Association, 1992).

Ecuación 5. Cálculo del potencial de biogás obtenido (Verein Deutscher Ingenieure, 2010)

$$Pe = \frac{VB}{Ms}$$

Donde:

VB: Volumen de biogás acumulado durante el tiempo de digestión t (ml)

Ms: Masa de sustrato adicionada al reactor en términos de sólidos volátiles (grSV).

Resultado de la aplicación de la ecuación anteriormente nombrada, se obtuvieron los siguientes datos en cuanto al potencial de biogás de las excretas de cerdo de la Unillanos con los respectivos inóculos utilizados (ver tabla 31):

Tabla 31. Potencial de biogás obtenido de las excretas de cerdo de la Unillanos.

Potencial de biogás obtenido ml/grSV			
Montaje 4 1:7		Montaje 5 1:10	
Excretas de cerdo –Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve	Excretas de cerdo- Inóculo de la Cosmopolitana	Excretas de cerdo –Inóculo del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve	Excretas de cerdo- Inóculo de la Cosmopolitana
0,94	24,25	16,07	2,49

Nota: Potencial de biogás que tienen las excretas de cerdo Unillanos con los inóculos del reactor de propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve y del centro agroecológico la Cosmopolitana. Por Ávila D, 2019.

10. Discusión

En la fase inicial del estudio, los resultados de la caracterización de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles indicaban una factibilidad desde el punto de vista de la materia orgánica prometedor, ya que la materia orgánica presente fue mayor a los de las excretas de cerdos, y presentaban las características necesarias para biodigestores, al igual que otros desechos orgánicos húmedos de origen agrícola, industrial, doméstico y municipal, así como las excretas de origen humano y animal (Rivas, Vargas, & Rossy, 2009), los resultados experimentales indicaron lo contrario.

Se probó que no hubo proceso de digestión (aparte de la ausencia de biogás) en los montajes realizados con excretas de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros, ya que al medir el pH una vez finalizado el tiempo de retención estaba igual o muy cercano al inicial, caso contrario de las excretas de cerdos de la Unillanos en las que el pH final bajó comparado con el inicial como consecuencia de que hubo digestión y por lo tanto producción de biogás.

En la fase experimental del proyecto de investigación se evidenció una inhibición del proceso de digestión para producir biogás. Este proceso puede verse afectado por una gran cantidad de factores, como la naturaleza del sustrato, pH, presencia de tóxicos e inhibidores, nutrientes y temperatura. (Solano, 2018)

Otro factor inhibitor del proceso, es el relacionado con el cuidado y manejo que se les brinda a los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros y las áreas que habitan en cumplimiento del “Protocolo general de manejo para el centro de recepción y rehabilitación de fauna silvestre del DAMA” (Montoya, González, Lozano, Patiño, & Cuadros, 2019), ya que estos animales silvestres presentan condiciones especiales por el hecho de vivir en cautiverio, un claro ejemplo, es la interacción de comensalismo con ciertos parásitos en la naturaleza, los cuales bajo estas condiciones pueden llegar a tornarse patógenos para el individuo, dejándolos a exposición de parásitos diferentes a los de la vida silvestre causando de esta manera más enfermedades, por lo cual, se debe estar desparasitando preventivamente estos animales. De igual manera sucede con la limpieza y desinfección, otro factor de inhibición a la hora de tener contacto con las excretas puesto que la desinfección implica la destrucción de microorganismos patógenos (bacterias, virus, hongos) (SAG Ministerio de Agricultura, 2019) cambiando de cierta forma las condiciones de las muestras como se evidenció al finalizar el proceso experimental.

A dichas conclusiones se llegó, luego de llevar a cabo cinco montajes durante el proceso experimental utilizando las excretas objeto de estudio (Bioparque Los Ocarros). Al realizar el primer montaje y observar que no se obtuvieron resultados de producción de biogás, se optó por utilizar una relación y dos inóculos de diferente procedencia al manejado en la primera prueba, así como en los dos últimos montajes se implementó la inclusión de excretas de cerdo Unillanos, contemplando que con este sustrato si se obtenía biogás mientras que con el de los animales silvestres aún no se contaba con resultados, por esta razón, se procedió a ejecutar una última prueba utilizando un reactor tipo Fed – Batch, el cual se encontraba en constante agitación llegando a la conclusión de que a pesar de que el sustrato estudiado contaba con características similares a la de las excretas de cerdo usadas, la razón por la que no se obtenía resultados en cuanto a producción de biogás se debía a la influencia de sustancias inhibidoras en las mismas.

Conclusiones

La caracterización en cuanto a Sólidos Totales (46,02%) y Sólidos Volátiles (97,00%) de los excrementos sólidos de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros es similar a la de los cerdos los cuales cuentan con un porcentaje de Sólidos Totales de (30,69%) y Sólidos Volátiles (56,97%) y otros animales utilizados para la producción de biogás.

Se evidenció que, como resultado del pesaje diario de las excretas producidas por los animales objeto de estudio durante los 15 días consecutivos, el día con mayor producción total diaria presentó un peso de 7 Kg y el de menor 2,7 Kg, con un promedio total además de 4,2 Kg, siendo esto técnicamente sin haber realizado pruebas de laboratorio, una cantidad de excretas con la que se puede llegar a diseñar un biodigestor con un volumen de 672 litros.

A pesar de que las excretas de los animales silvestres estudiados presentan características similares a las de un cerdo en cuanto a Sólidos Totales y Volátiles, no son factibles para producir biogás en sus condiciones actuales.

Las biomásas activas que se utilizaron en el estudio experimental presentaron datos de las características fisicoquímicas que no se encontraban en los rangos óptimos que establecía el manual de biogás, indicando de esta forma que en los resultados generados se iba a presentar gran variabilidad en cuanto a su producción.

Recomendaciones

El presente proyecto puede ser referente de futuros trabajos relacionados con el tema, considerando que la metodología implementada cumple con los objetivos planteados puesto que a través de su ejecución se logró identificar la factibilidad de las excretas estudiadas para producir biogás, sin embargo, se recomienda a futuros investigadores cerciorarse de que el día que tomen las muestras a estudiar de este tipo de animales, no les hayan suministrado recientemente ningún tipo de medicamento, del mismo modo no hayan utilizado detergente en las áreas de manejo puesto que allí es donde se recogen las excretas con el fin de evitar posibles inhibiciones en el proceso.

Para determinar el agente inhibitorio de las excretas exóticas se recomienda realizar un estudio mas detallado con diferentes concentraciones de los antibióticos y medicinas usadas con estos animales. No todas las sustancias son inhibitorias, por lo que si es posible identificar el medicamento causante de la inhibición, se podría sustituir por otro y de esta forma anular la inhibición, para que puedan usarse las excretas en la producción de biogás.

Esta investigación se vió limitada al final porque no se pudo obtener información mas detallada sobre el tipo de medicamentos que se les brindaba a los animales objeto de estudio, además no se pudo obtener otra muestra de excretas para la realización de las pruebas de factibilidad, por lo que se recomienda que al iniciar un proyecto con una entidad de este tipo, se realice por firmado un compromiso el cual diga que tanto la institución como los estudiantes brindaran información del proyecto hasta que se de por terminado.

Referencias bibliográficas

- Agencia de Noticias UN . (5 de Agosto de 2016). Biogás a partir de poda y residuos alimenticios. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de Unimedios : <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/biogas-a-partir-de-poda-y-residuos-alimenticios.html>
- Ainfar. (18 de Enero de 2017). *Los beneficios de las energías renovables*. Obtenido de ainfar.net: <https://ainfar.net/blog/los-beneficios-de-las-energias-renovables>
- Ainia. (2008). *Ensayo de potencial de biogás*. Obtenido de <https://www.ainia.es/?s=Ensayo+de+potencial+de+biog%C3%A1s>
- American Public Health Association. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid(España): Ediciones Díaz de Santos, S. A.
- Arboleda , Y., & González, L. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores - Módulo para la asignatura de construcciones agrícolas. *Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas*. Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/7967/4/luisoctaviogonzalezsalcedo.20121.pdf>
- Ardila, A., Daza, L., Jascón, S., & Nuñez, D. (2019). *Evaluación de la producción de biogás del biodigestor de la Hacienda Cosmopolitana (Villavicencio, Colombia)*. Bogotá: Universidad el Bosque. Obtenido de https://www.academia.edu/23848124/Evaluaci%C3%B3n_de_la_producci%C3%B3n_de_biog%C3%A1s_del_biodigestor_de_la_Hacienda_Cosmopolitana_Villavicencio_Colombia
- Arley, P., & Parra , S. (2017). *Obtención de biogás a partir de estiércol de cerdo utilizando un biodigestor*. Pasto: Universidad Mariana.
- Biodisol . (2018). *Digestión anaerobia. Proceso de producción de biogás*. Obtenido de <http://www.biodisol.com/que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas/digestion-anaerobia-proceso-de-produccion-de-biogas-biocombustibles-energias-renovables/>
- Bolívar , H., & Ramírez, E. (2012). Propuesta para el diseño de un biodigestor para el aprovechamiento de la materia orgánica generada en los frigoríficos de Bogotá. *Trabajo*

- de grado*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de <http://udistrital.edu.co:8080/documents/138588/3154083/documento+final.pdf>
- Campos, B. (2011). Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2), p.37-41. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v20n2/rcta07211.pdf>
- Cárdenas, L., Parra, B., Torres, P., & Vásquez, C. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Reivsta ION: Investigación, Optimización y Nuevos procesos en ingeniería*, 29(1), p.95-108. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/5629/5799>
- Carta, J., Calero, R., Colmenar, A., Castro, M., & Collado, E. (2013). *Centrales de energías renovables*. Madrid, España: UNED.
- Castillo, A. L. (2018). Estudio de la producción de biogás mediante la co-digestión anaerobia usando como sustrato el mucílago de café y como inóculos el estiércol porcino y estiércol bovino. *Trabajo de grado*. Bucaramanga: Universidad Santo Tomás. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/13008/2018adrianamendivelso.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Conil, P. (01 de Enero de 2000). *El aprovechamiento del biogás de las lagunas de estabilización : perfil del proyecto Palmeiras en Tumaco (Colombia)*. Obtenido de CID Palmero: Centro de Información y Documentación Palmero: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/790>
- Constanza, L., Antolinez, D., Bohórquez, J., & Corredor, A. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Revista NOVA*, 13(24), p.55-81. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf>
- Córdoba, V., Fernadez, M., & Santalla, E. (26 de Septiembre de 2014). *Influencia del inóculo en la digestión anaeróbica de purín de cerdo*. Obtenido de Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo, ASADES: https://www.researchgate.net/publication/268386719_Influencia_del_inoculo_en_la_digestion_anaerobica_de_purin_de_cerdo

- Decreto 2981. (20 de diciembre de 2013). *Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo*. Bogotá, Colombia: Diario Oficial No.49010. Obtenido de http://www2.igac.gov.co/igac_web/normograma_files/Decreto%202891%20de%202013.pdf
- Decreto No.2811. (18 de diciembre de 1974). *Por el cual se dicta el código nacional de los recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente*. Bogotá, Colombia: Diario Oficial No 34.243. Obtenido de <http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/31352/08-08-25-0256PS-Anexo.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Díaz, M., Espitia, S., & Molina, F. (2002). *Digestión Anaerobia*. Bogotá: Unibiblos.
- Farlex, Inc. (2013). *Concepto de Excrementos sólidos*. Obtenido de The Free Dictionary: https://es.thefreedictionary.com/_/cite.aspx?url=https%3A%2F%2Fes.thefreedictionary.com%2Festi%25c3%25a9rcoles&word=esti%C3%A9rcoles&sources=Larousse_GDLE,vox1,kdict,vox_thes,hc_Es_En
- Galvez, Y. (2017). *Producción de biogás a partir del estiércol de ganado*. Tingo Maria, Perú: Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- García, A., & Gómez, J. (2016). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la Central de Abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia. *Trabajo de grado*. Bogotá, Colombia: Fundación Universidad de América. Obtenido de <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/667/1/6112733-2016-2-IQ.pdf>
- Gutierrez, J. I. (1995). *Biblioteca del campo granja integral autosuficiente. Agua, suelos, abonos y lombrices*. Bogotá: Disloque Editorial.
- Hanson, E. (1 de Febrero de 2018). *¿Qué es un ambiente anaeróbico?* Obtenido de Geniolandia: <https://www.geniolandia.com/13067475/que-es-un-ambiente-anaerobico>
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas. (31 de Marzo de 2011). *NTC 5167: Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. Obtenido de ICONTEC: <https://ecollection-icontec-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/pdfview/viewer.aspx?locale=es-419&Q=5022D7CD94A3A88806E800CB97586ABB2B1DA961E0A07526&Req=>

- Ini, L. (16 de Septiembre de 2015). *Biogás a partir de estiércol animal en los zoos más virtuosos*. Obtenido de Energías Renovables: <https://www.energias-renovables.com/biogas/biogas-a-partir-de-estiercol-animal-en-20150916>
- Instituto de Turismo del Meta. (2017). *Bioparque Los Ocarros*. Obtenido de turismometa.gov.co: <http://www.turismometa.gov.co/el-meta/sitios-turisticos/bioparque-los-ocarros.html>
- International Standard ISO. (Diciembre de 1995). ISO 11734. *Water quality — Evaluation of the "ultimate" anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge — Method by measurement of the biogas production*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/19656.html>
- Jaramillo, E. H. (2018). Bioeconomía: el futuro sostenible. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(164), p.188-201. Obtenido de <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/650/486>
- Ley 1665. (16 de Julio de 2013). *Por medio de la cual se aprueba el “Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena)”*, hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009. Bogotá, Colombia: Diario Oficial No. 48.853. Obtenido de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1665_2013.html
- Ley 1715. (18 de Marzo de 2019). *Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional*. Bogotá, Colombia: Diario Oficial No. 49.150. Obtenido de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html
- Ley 629. (27 de Diciembre de 2000). Bogotá, Colombia: Diario Oficial No. 44.272. Obtenido de Por medio de la cual se aprueba el "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997.: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0629_2000.html
- Ley 697. (03 de Octubre de 2001). *mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones*. Bogotá, Colombia: Diario Oficial No. 44.573. Obtenido de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0697_2001.html
- Ley 788. (27 de Diciembre de 2002). Bogotá, Colombia: Diario Oficial No.45046. Obtenido de Por la cual se expiden normas en materia tributaria y penal del orden nacional y territorial;

- y se dictan otras disposiciones.:
<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=7260>
- Lorenzo, Y., & Obaya, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de*, 34(1), p.35-48. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>
- Manfredi, I. (03 de 01 de 2014). *El maíz se hace gas*. Obtenido de Agrovoz: <http://agrovoz.lavoz.com.ar/la-voz-del-campo/el-maiz-se-hace-gas>
- Martínez, M. (2015). Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato. *Revista Nova Scientia*, 7(15), p.96-115. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6214565.pdf>
- Michigan Economic Development Corporation (MEDC). (2015). *Detroit Zoo Biodigester - Green Spaces and Green Energy*. Obtenido de [patronicity.com: https://www.patronicity.com/project/detroit_zoo_biodigester__green_spaces_and_green_energy#!/](https://www.patronicity.com/project/detroit_zoo_biodigester__green_spaces_and_green_energy#!/)
- Montenegro, K., Rojas, A., Cabeza, I., & Hernández, M. (2016). Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca. *Revista ION: Investigación, Optimización y Nuevos Procesos en Ingeniería*, 29(2), p.23-37. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/5982/6259>
- Montoya, F., González, C., Lozano, I., Patiño, X., & Cuadros, L. (2019). *Protocolo general de manejo para el centro de recepción y rehabilitación de fauna silvestre del DAMA*. Bogotá.
- Moretta, A., & Jara, F. (2011). Estudio de un sistema de energía renovable para la producción de biogás a partir de excretas de ganado porcino para disminuir el consumo de gas doméstico en la hacienda “El Márquez” del sector de Cunchibambade la provincia de Tungurahua. *Trabajo de grado*. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/2152/1/Tesis%20I.%20M.%20143%20-%20Jara%20Salazar%20Francisco%20Xavier.pdf>
- Nick Glass, G. W. (11 de Octubre de 2011). *Elephant-poo power electrifies zoo*. Obtenido de CNN World: <https://edition.cnn.com/2011/10/10/world/europe/elephant-dung-biogas-munich/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile: MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. Obtenido de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

- Panseri, S., Pognani, M., Cavalli, M., Imporzano, G., Chiesa, L., & Adani, F. (2013). Efectos de antibióticos veterinarios en la producción de biogás. En *Internacional biodeterioro y biodegradación*. Milán, Italia: Elsevier.
- Portillo, G. (09 de Mayo de 2017). *Se produce biogás a partir de residuos de plantas invasoras*. Obtenido de Renovables Verdes: <https://www.renovablesverdes.com/se-produce-biogas-partir-residuos-plantas-invasoras/>
- Ramírez, G. (2016). Valoración de la producción de biogás durante un proceso de digestión anaerobia con contenido ruminal de origen bovino bajo condiciones de tiempo, carga y temperatura diferenciales. *Trabajo de grado*. Manizales, Colombia: Universidad de Manizales. Obtenido de http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2771/Ramirez_Sanchez_Gloria_pdf.2016%20%282%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ramos Suárez, J. L. (2014). Producción de biogas a partir de biomasa de la microalga *Scenedesmus* sp. procedente de diferentes procesos. *Tesis doctoral*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de http://oa.upm.es/28957/1/JUAN_LUIS_RAMOS_SUAREZ.pdf
- Resolución No.1207. (13 de Agosto de 2014). *por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas*. Bogotá, Colombia: Diario Oficial No.49242. Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf
- Resolución No.631. (17 de Marzo de 2017). *Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones*. Bogotá, Colombia: Diario Oficial No.49.486. Obtenido de https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf
- Rico, J. (26 de Septiembre de 2016). *Biogas: Premio para el biogás que mejora la salud de las mujeres africanas*. Obtenido de Energías Renovables: <https://www.energias-renovables.com/biogas/premio-para-el-biogas-que-mejora-la-20160926>

- Rico, J. (08 de Enero de 2018). *Biogas: Alumbrado público con el biogás de excrementos de perros*. Obtenido de Energías renovables: <https://www.energias-renovables.com/biogas/alumbrado-publico-con-el-biogas-de-excrementos-20180108>
- Rivas, O., Vargas, M., & Rossy, W. (2009). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Revista Tecnología en Marcha*, 23(1), p.39-46. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4835857.pdf>
- Rodriguez, D., & Garcia, A. (2017). Diseño y construcción de un biodigestor para la producción de biogás a partir de heces caninas. *Trabajo de grado*. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6949/1/DavidAlexanderRodriguezPach%C3%B3n2017.pdf>
- Rojas, C. (2014). *Simulación y modelamiento del proceso anaerobio para la producción de biogás con diferentes sustratos*. Alemania: Universidad Técnica de Hamburgo.
- SAG Ministerio de Agricultura. (2019). *Criterios técnicos para la mantención y manejo de fauna silvestre en cautiverio*. Chile: Gobierno de Chile. Obtenido de http://www.sag.cl/sites/default/files/criterios_tec_mantencion_fauna_silv_cautiverio.pdf
- Solano, O. (2018). Estudio del potencial de la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de la digestión anaerobia de estiércol. *Trabajo de grado*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Santo Tomás. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/13169/2018oscarsolano.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Spada, S. (02 de 07 de 2016). *¿Qué son realmente los zoos*. Obtenido de porelfindeloszoosyacuarios.wordpress.com: <https://porelfindeloszoosyacuarios.wordpress.com/consecuencias-para-los-animales/>
- Stelfox, E. (2019). *Información general*. Obtenido de E4 Environment: <http://www.e4environment.co.uk/zoo-waste/>
- Teilen, D. B. (5 de Febrero de 2018). *¿Qué funciones tienen los zoológicos?* Obtenido de Zoo-realidad : <http://zoos.media/zoo-realidad/que-funciones-tienen-los-zoologicos/?lang=es>
- Universidad Veracruzana. (2019). Bioingeniería. *Unidad 2. Biorreactores y su aplicación*. Veracruz, México: Facultad de Ciencias Químicas. Obtenido de Bioingeniería : <https://sites.google.com/site/bioingenieriauv15/unidad-2-biorreactores-y-su-aplicacion>

- Universo Porcino. (07 de Abril de 2019). *Factores que afectan la producción de biogas*. Obtenido de Universo porcino: http://www.aacporcinos.com.ar/articulos/instalaciones_porcinas_17-08-2017_factores_que_afectan_a_la_produccion_de_biogas.html
- Velásquez, M., Rincón , J., Guevara , P., Vargas, J., Castellanos , D., Duarte, C., . . . Quintero, J. (2018). Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento. *Informe Final: Grupo de investigación en procesos químicos y bioquímicos*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería y Centro de Desarrollo Industrial TECSOL. Obtenido de <https://bdigital.upme.gov.co/jspui/bitstream/001/1317/1/Informe%20final.pdf>
- Verein Deutscher Ingenieure. (Agosto de 2010). Emissionsminderung - Biogasanlagen in der Landwirtschaft - Vergärung von Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger. *Norma técnica: VDI 3475 Blatt 4:2010-08*. Beuth Verlag GmbH. Obtenido de <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-3475-blatt-4/129221743>

Anexos

Anexo 1. Diagrama de flujo de la metodología.

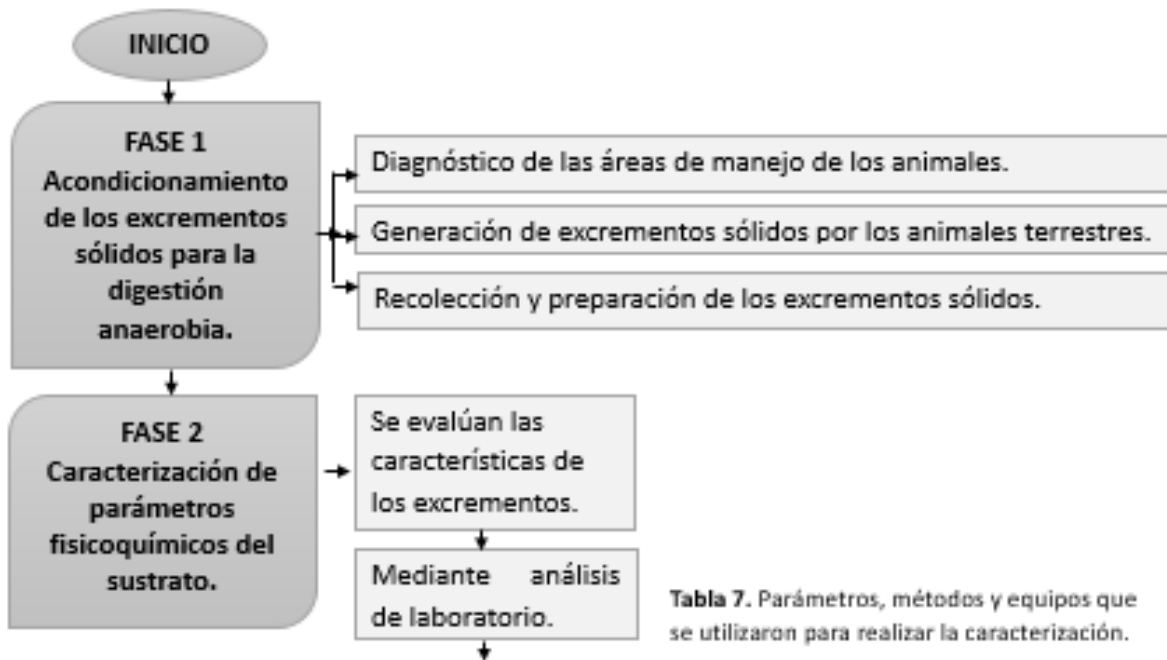


Tabla 7. Parámetros, métodos y equipos que se utilizaron para realizar la caracterización.

Parámetro	Método	N° Método Estándar	Equipos
% Humedad	Gravimétrico	2540B	-Horno
% Sólidos Totales			-Balanza analítica
% Sólidos Volátiles	Gravimétrico	2540E	-Muffa -Balanza analítica
DQO (Demanda química de Oxígeno)	Espectrofotométrico	5220D	-Termoreactor -Espectrofotómetro
pH			Electrométrico
Carbono (C)	Oxidación	5530	-Relación Empírica
Nitrógeno (N)	Espectrofotométrico	4500-N Org.	-Termoreactor -Espectrofotómetro
Fósforo (P)		4500P	
Azufre (S)		4500S	

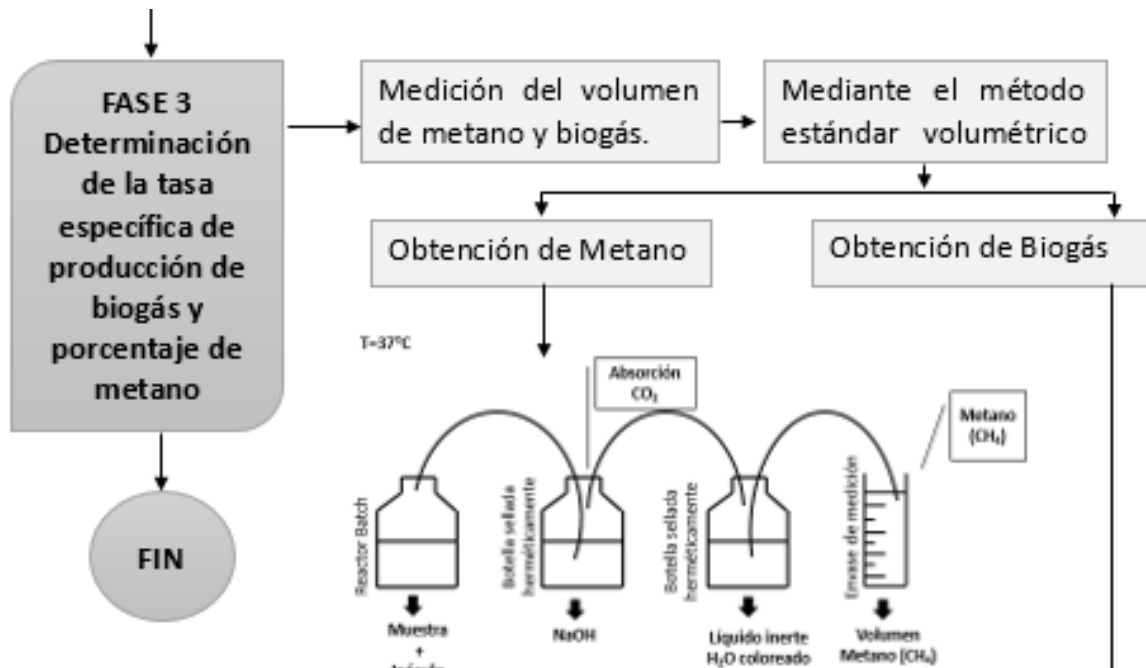


Figura 1. Montaje experimental para la obtención del porcentaje de metano. Por Padilla. L, 2018.

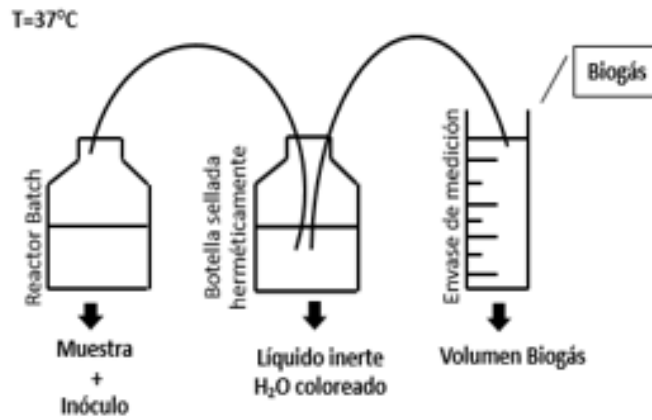


Figura 2. Montaje experimental para obtención de la tasa específica de biogás. Por Avila. D, 2018.

Figura 1. Esquema de la metodología que se realizó para el cumplimiento de los objetivos. Por Ávila D, 2019.

Anexo 2. Evidencia de la homogenización de las excretas a utilizar.



Figura 2. Homogenización de las excretas a utilizar. Por Padilla. L, 2019.

Anexo 3. Biomasa alimentada (excretas de animales) y biomasa activa (inóculo) que se utilizaron para la investigación.

- **Biomasa alimentada (Excretas de animales)**



Figura 3. Excretas de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros objeto de estudio. Por Padilla. L, 2019.



Figura 4. Excretas de los cerdos de la Unillanos. Por Ávila D, 2019.

- **Biomasa activa (inóculos)**



Figura 5. Inóculo obtenido del reactor de la USTA (alimentado con cáscara de naranja). Por Ávila D, 2019.



Figura 6. Inóculo de un biodigestor ubicado en el Centro Agroecológico La Cosmopolitana (alimentado con excretas de cerdo). Por Padilla. L, 2019.



Figura 7. Inóculo obtenido del reactor propiedad del estudiante Diego Felipe Martínez Monsalve (alimentado con excretas de cerdo). Por Padilla, L, 2019.

Anexo 4. Determinación de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles para excretas e inóculos utilizados.

A continuación en la Tabla 1 se puede observar un ejemplo de como se realizó el cálculo de ST y SV para las excretas e inóculos utilizados.

Tabla 1. Determinación de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles.

SUSTRATO:				
EXCRETAS DE LOS ANIMALES TERRESTRES DEL BIOPARQUE LOS OCARROS				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Peso cápsula vacía	89,036	91,925	88,327	88,230
Peso masa húmeda	98,655	101,591	98,050	98,028
Secar en el horno a 105°C (2 horas si es muestra sólida, 24 horas si es muestra líquida)				
Peso cápsula + residuo	91,304	94,329	90,309	90,230
Sólidos Totales (%)	48,64	48,74	48,45	48,44
Promedio	48,56			
Humedad	51,36	51,26	51,55	51,56
Peso crisol vacío	18,762	17,836	17,313	16,994
Peso masa seca	21,032	20,252	19,331	19,015
Llevar a la mufla a 500°C por 2 horas				
Peso crisol + cenizas	19,512	18,625	17,965	17,625
Sólidos Volátiles (%)	96,43	96,10	96,62	96,68

Fuente: Autores

En relación a la tabla anterior es importante aclarar que para la determinación de ST y SV para las excretas se tomaban 10 gr de la muestra sólida (Figura 8) y para los inóculos se tomaban 50 ml de la muestra líquida (Figura 9).



Figura 8. Muestra de excretas de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros utilizadas para la determinación de ST y SV. Por Padilla. L, 2019.



Figura 9. Muestra del inóculo obtenido de La Cosmopolitana utilizado para la determinación de ST y SV. Por Ávila D, 2019.

Anexo 5. Expresión de la recta correspondiente para obtener la equivalencia en mg/L de los compuestos DQO, S, N, P, NO_3^- .

Se emplearon las siguientes curvas patrón, las cuales fueron realizadas por el Ingeniero Christian José Rojas Reina en el laboratorio de aguas para llevar a cabo los análisis de los parámetros realizados.

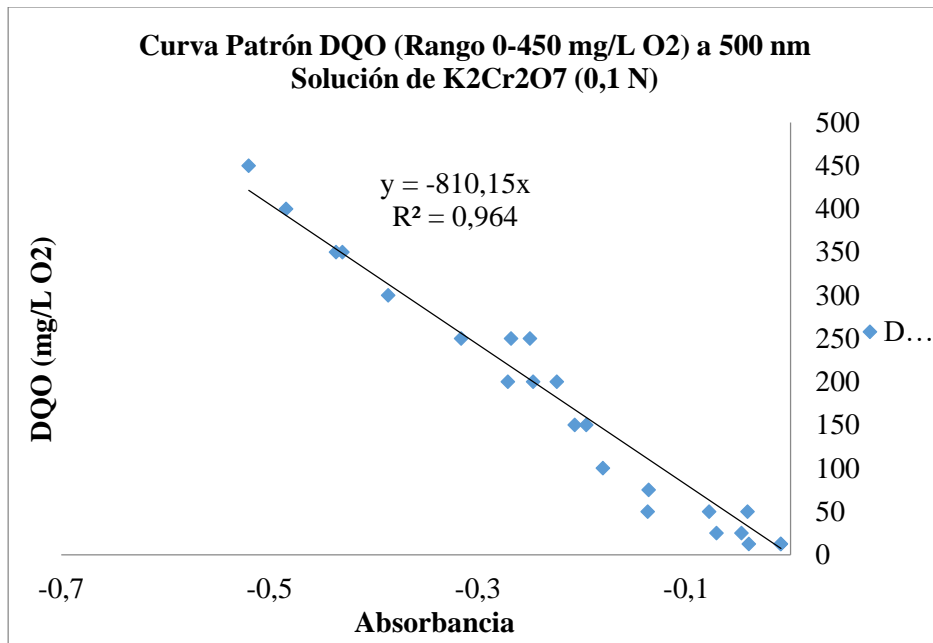


Figura 10. Curva patrón DQO.

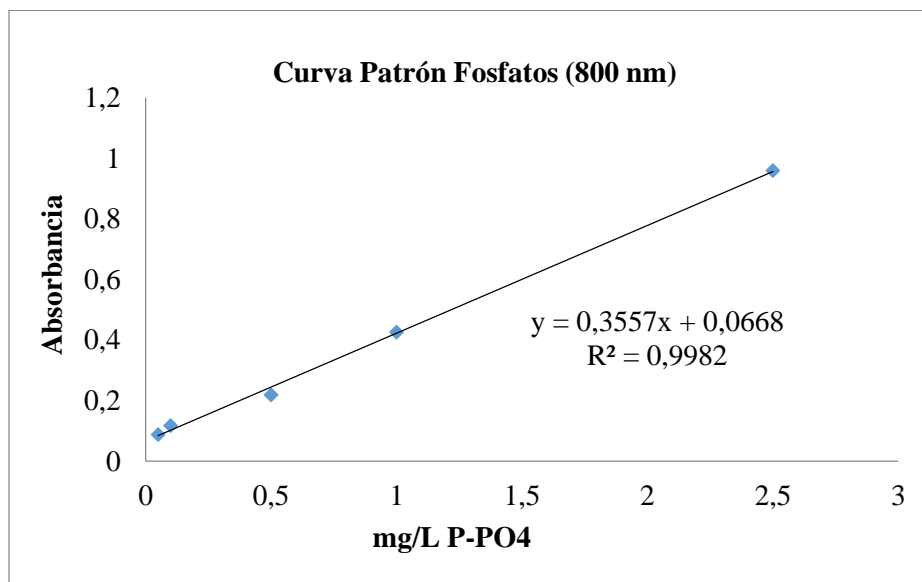


Figura 11. Curva patrón Fosfato (P).

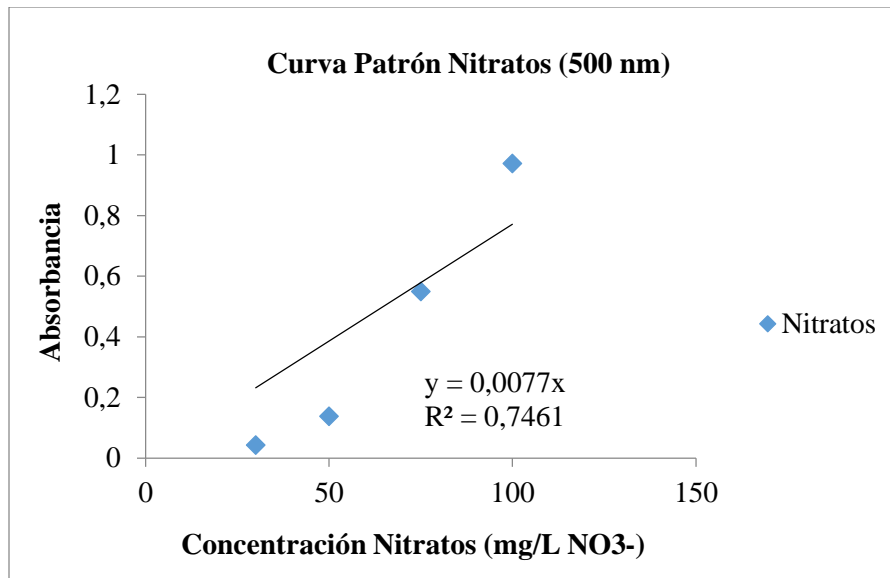


Figura 12. Curva patrón Nitratos (NO₃⁻).

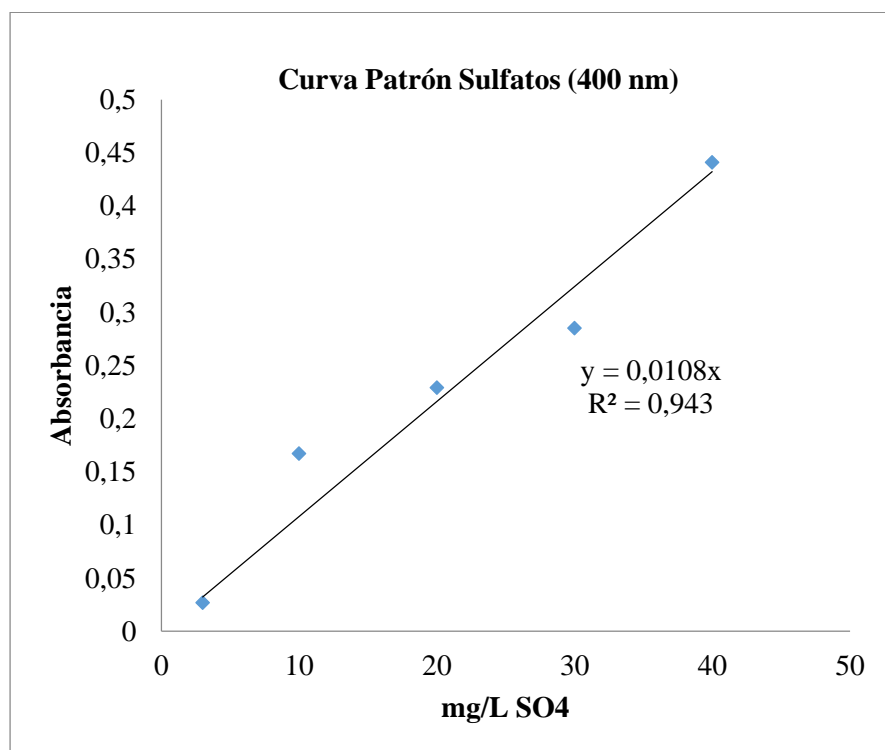


Figura 13. Curva patrón Sulfatos (S).

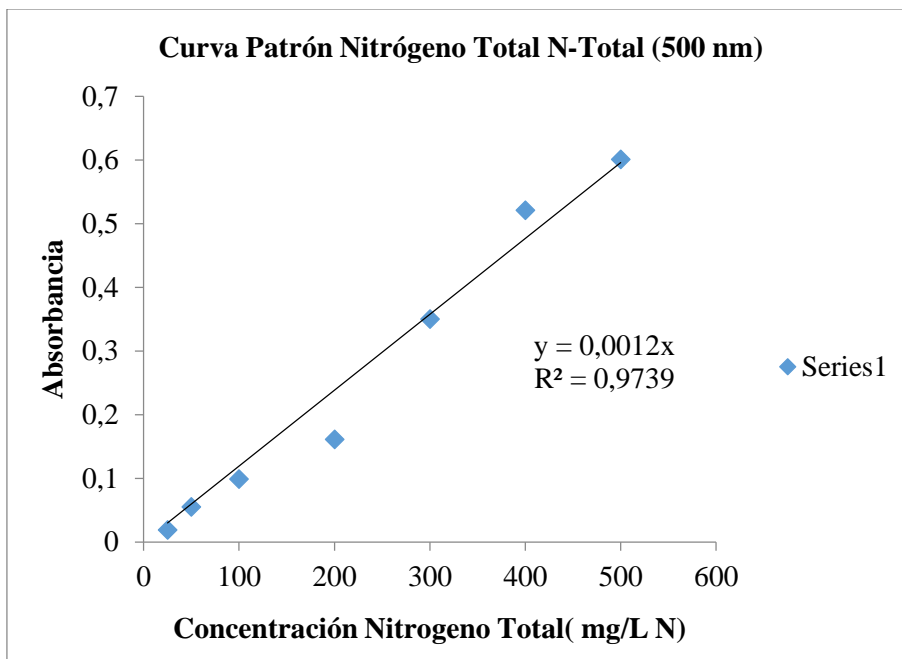


Figura 14. Curva patrón Nitrógeno Total (N).

Dichas curvas patrón se realizaron partiendo de las muestras que se hicieron (Figura 15). Una vez obtenidas estas curvas, se procedía a relacionar los datos de absorbancia de DQO, S, N, P, NO_3^- que arrojaba el espectrofotómetro y se ingresaban dichos resultados en la ecuación de la recta de la curva patrón correspondiente para cada parámetro. En cuanto a Nitritos (NO_2^-) no se hizo curva ya que su medición era presentada directamente en mg/L.



Figura 15. Muestras de excretas de los animales terrestres del Bioparque Los Ocarros para la determinación de DQO, S, N, P, NO_3^- , NO_2^- . Por Padilla, L, 2019.

Anexo 6. Montaje experimental a escala piloto utilizando las excretas del Bioparque Los Ocarros y excretas de los cerdos de la Unillanos



Figura 16. Montaje experimental a escala piloto que se empleo para las excretas del Bioparque Los Ocarros y excretas de los cerdos de la Unillanos. Por Ávila D, 2019.