

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS
PRODUCIDOS POR LOS CULTIVOS DE PLÁTANO EN EL USO COMO CO-SUSTRATO
CON EXCRETAS PORCINAS PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS.



DIANA MARCELA QUIJANO SÁNCHEZ
LINA ALEJANDRA RAMIREZ SERRANO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2020

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS
PRODUCIDOS POR LOS CULTIVOS DE PLÁTANO EN EL USO COMO CO-SUSTRATO
CON EXCRETAS PORCINAS PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS.

DIANA MARCELA QUIJANO SÁNCHEZ
LINA ALEJANDRA RAMIREZ SERRANO

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

Asesor
CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA
PhD. Msc. Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2020

Autoridades Académicas

P. José Gabriel MESA ANGULO, O.P.

Rector General

P. Eduardo GONZALES GIL, O.P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA O.P

Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Mg. Ing. YÉSSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota de Aceptación

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decano de Facultad de Ingeniería Ambiental

CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

Director de trabajo de grado

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Jurado

OLGA LUCIA CUBIDES DUSSAN

Jurado

Villavicencio, abril, 2020

Dedicatoria

Dedico y agradezco a Dios por la fortaleza y la sabiduría para afrontar cada reto a lo largo de mi carrera profesional, a mis padres por el apoyo incondicional y la motivación de creer en mí, a mi hermanito Elver Eduardo que desde el cielo me guio y me dirigió por el bueno camino para lograr mis objetivos.

Lina Alejandra Ramirez Serrano

Contenido

Resumen	12
1. Introducción	14
2. Planteamiento del problema	15
2.1 Formulación entorno al problema	16
2.2 Formulación de la hipótesis.....	16
3. Objetivos.....	17
3.1 Objetivo general.....	17
3.2 Objetivos específicos	17
4. Justificación	18
5. Alcance	20
6. Antecedentes.....	21
7. Marco de referencia	25
7.1 Marco Teórico.....	25
7.2 Marco Conceptual:.....	29
7.3 Marco Legal:.....	31
8. Metodología.....	33
8.1. Caracterización físico-química de los sustratos:.....	33
8.2 Experimentos para determinación de biopotencial de Biogás:	35
8.3 Experimentos a escala piloto en reactor semicontinuo:.....	36
8.4 Comparación teórica del biopotencial de biogás de otros co-sustratos con el realizado experimentalmente:.....	37
9. Resultados y análisis	39
9.1 Caracterización de excretas porcinas, plátano e inóculo.	39
9.1.1 Plátano	39
9.1.2 Excretas porcinas	40
9.1.3 Inóculo	42
9.2 Análisis de la producción de biopotencial de biogás y metano de las corridas.	45
□ Corrida 1	46
□ Corrida 2	49
□ Corrida 3	52
9.3 Producción instantánea de biogás en reactor semicontinuo a escala piloto.	56

9.4 Comparación teórica del biopotencial de biogás de otros co-sustratos con el realizado experimentalmente.....	59
10. Discusión de resultados.....	61
Conclusiones.....	62
Recomendaciones	63
Referencias bibliográficas.....	64

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de sustratos para la digestión anaerobia.....	25
Tabla 2. Condiciones agroecológicas favorables para el desarrollo de las variables más cultivadas.	26
Tabla 3. Características generales del biogás.	29
Tabla 4. Parámetros para caracterización de los sustratos.....	33
Tabla 5. Cantidad de sustrato para los microreactores.	36
Tabla 6. Frecuencia de alimentación del reactor.	36
Tabla 7. Cantidad de co-sustrato para el reactor.....	37
Tabla 8. Características físico-químicas del co-sustrato.....	39
Tabla 9. Características físico-químicas de sustrato principal.....	40
Tabla 10. Características físico-químicas de los inóculos empleados.	42
Tabla 11. (A) Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del sustrato excretas corrida 1.	46
Tabla 12. (A) Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del co-sustrato vástago y plátano descartado corrida 1.	47
Tabla 13. (A) Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del sustrato excretas corrida 2.	49
Tabla 14. (A) Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del co-sustrato vástago y plátano descartado corrida 2.	50
Tabla 15. (A) Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del sustrato excretas corrida 3.	52
Tabla 16. (A) Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del co-sustrato vástago y plátano descartado corrida 3.	53
Tabla 17. Biopotencial de biogás y % de metano de las 3 corridas realizadas.	55
Tabla 18. Biopotencial de biogás de co-sustratos orgánicos.	56
Tabla 19. Cantidad de co-sustrato añadido al reactor1 y al reactor 2.....	56
Tabla 20. Volumen desplazado por el biorreactor durante la corrida.	57
Tabla 21. Producción instantánea de biogás del co-sustrato.....	58
Tabla 22. Comparación teórica de la cantidad de biogás producido por diferentes co-sustratos.	59

Lista de Figuras

Figura 1. Proceso de digestión anaerobia.	28
Figura 2. Montaje para la determinación de sólidos totales del inóculo.....	33
Figura 3. Montaje para la determinación de sólidos totales de las excretas	34
Figura 4. Montaje para la determinación de sólidos volátiles del inóculo, después de 505 °C.	34
Figura 5. Montaje de sólidos volátiles de las excretas, después de 505 °C.	34
Figura 6. Tubos en termoreactor para pruebas de DQO y nitrógeno total.....	34
Figura 7. Montaje experimental para la determinación de biogás y metano a escala de laboratorio en microreactores tipo batch.	35
Figura 8. Reactor semicontinuo tipo fed-batch.....	37
Figura 9. Diagrama metodológico.	38
Figura 10. Co-sustrato seleccionado en el municipio de Fuente de Oro-Meta.....	40
Figura 11. Cerdos de cría de la Universidad de Los Llanos.	41
Figura 12. Cerdos de levante de la Colonia Agrícola de Acacias.....	41
Figura 13. Reactor Finca Agroturística La Cosmopolitana	42
Figura 14. Montaje de medición de desplazamiento de biogás	56

Lista de graficas

Grafica 1. Curva de la variación de pH del Inóculo 2	44
Grafica 2. Curva de la variación de la conductividad del Inóculo 2.....	45
Grafica 3. (A) Curva de producción diaria y (B) diaria acumulada de biogás y metano del sustrato excretas en la corrida 1	47
Grafica 4. (A) Curva de producción diaria y (B) diaria acumulada de biogás y metano del co-sustrato vástago y plátano descartado en la corrida 1..	48
Grafica 5. (A) Curva de producción diaria y (B) diaria acumulada de biogás y metano del sustrato excretas en la corrida 2.	50
Grafica 6. (A) Curva de producción diaria y (B) diaria acumulada de biogás y metano del co-sustrato vástago y plátano descartado en la corrida 2.....	51
Grafica 7. (A) Curva de producción diaria y (B) diaria acumulada de biogás y metano del sustrato excretas en la corrida 3.....	53
Grafica 8. (A) Curva de producción diaria y (B) diaria acumulada de biogás y metano del co-sustrato vástago y plátano descartado en la corrida 3	54
Grafica 9. Curva de producción diaria de biogás en ml por el reactor 1 y 2	57

Lista de anexos

Anexo A. Tablas de valores de sólidos totales y sólidos volátiles del co-sustrato y sustratos principales.	70
Anexo B. Datos reales diarios y acumulado de las 3 corridas realizadas.	73
Anexo C. Ecuaciones para la determinación del biopotencial de biogas y el % de metano.	77
Anexo D. Datos normalizados diarios y acumulados de las corridas realizadas.	78
Anexo E. Relación para la determinación del volumen producido en litros durante 24/h por 7 días.	82

Resumen

La producción de biogás en uno de los procesos con más auge respecto al aprovechamiento de los residuos agroindustriales en el departamento del Meta, ya que es una alternativa que contribuye a la disminución de los problemas más comunes que se presentan en las zonas rurales del departamento. De este modo la presente investigación se basó en la determinación de la factibilidad del uso de residuos orgánicos generados por los cultivos de plátano (vástago y plátano descartado) como co-sustrato para la co-digestión anaerobia con excremento porcino para la producción de biogás. Se determinaron las características físico-químicas del vástago y plátano descartado como co-sustrato, allí se obtuvo resultados de 80,52% de SV y 24,35% de ST, permitiendo así la identificación previa del biopotencial de biogás que podía producir teniendo en cuenta otros factores como temperatura, humedad, tamaño de la partícula, pH, y naturaleza del co-sustrato.

La factibilidad de producción del biopotencial de biogás del co-sustrato en co-digestión se realizó mediante un proceso de digestión anaerobia a través de un montaje experimental que se mantuvo a condiciones de temperatura mesofílica constante de 37°C, utilizando 6 recipientes de vidrio que cumplían la función de reactores tipo batch, en los cuales se realizaron 3 corridas, cada una de ellas con un tiempo de retención de 20 días y una cantidad de co-sustrato añadido de 1g. Durante los ensayos experimentales se determinó la producción de biogás a través del desplazamiento de volumen, el cual se midió diariamente. A partir del volumen acumulado desplazado durante la duración de cada corrida experimental y el co-sustrato agregado (vástago y plátano descartado) en cada reactor batch, se determinó el biopotencial de biogás del co-sustrato. Este biopotencial fue de 402,33 ml/g SV y 82% de CH₄ para los residuos de vástago y plátano descartado, donde se realizó un montaje para la determinación de la producción de biogás instantánea del co-sustrato, en un reactor agitado de 4 L. En este reactor se realizó una corrida con un tiempo de retención de 7 días, y una cantidad de co-sustrato añadido de 20g, dando como resultado 2313,98 ml/d*g SV. Estos resultados demuestran una viabilidad para el uso y ejecución en reactores rurales, como método de energía alternativa y contribución para el suministro energético.

Palabras Clave: Biogás, co-digestión anaerobia, co-sustrato, biomasa, residuos orgánicos, metano.

Abstract

The production of biogas in one of the most booming processes regarding the use of agro-industrial waste in the department of Meta, since it is an alternative that contributes to the reduction of the most common problems that arise in the rural areas of the department. Thus, the present investigation was based on determining the feasibility of using organic residues generated by plantain crops (stem and discarded plantain) as a co-substrate for anaerobic co-digestion with porcine excrement for the production of biogas. The physical-chemical characteristics of the stem and banana discarded as co-substrate were determined, there were obtained results of 80.52% of SV and 24.35% of ST, as well as the previous identification of the biogas biopotential that could have been received in account for other factors such as temperature, humidity, particle size, pH and nature of the co-substrate.

The feasibility of producing the biogas biopotential of the co-substrate in co-digestion was carried out by means of an anaerobic digestion process through an experimental setup that was carried out at constant mesophilic temperature conditions of 37 ° C, using 6 glass containers that they fulfilled the function of batch-type reactors, in which 3 runs have been configured, each with a retention time of 20 days and an amount of added co-substrate of 1g. During the experimental tests, the biogas production was determined through the volume displacement, which was measured daily. From the accumulated volume displaced during the duration of each experimental run and the added co-substrate (stem and banana discarded) in each batch reactor, the biogas biopotential of the co-substrate is determined. This biopotential was 402.33 ml / g SV and 82% CH₄ for the discarded stem and banana residues, where an assembly was carried out to determine the instantaneous biogas production of the co-substrate, in a stirred reactor of 4 L. In this reactor, a run was carried out with a retention time of 7 days, and an amount of added co-substrate of 20 g, resulting in 2313.98 ml / d * g SV. These results require viability for use and execution in rural reactors, as an alternative energy method and contribution to energy supply.

Key Words: Biogas, anaerobic co-digestion, co-substrate, biomass, organic waste, methane.

1. Introducción

El cultivo de plátano en Colombia se desarrolla en la mayor parte del territorio nacional siendo de gran importancia para el sector socioeconómico generando empleo en las zonas rurales, con una producción significativa del 87% (Castellanos & Lucas, 2011). Durante los años del 2006-2012, la producción de plátano en Colombia se situó aproximadamente en los tres millones de toneladas, una de las producciones agrícolas más altas, ya que forma parte de los alimentos básicos de la canasta familiar de los habitantes del país (García, Jiménez, García, & Jaramillo, 2018). Cerca del 95% de los residuos orgánicos que se generan en los cultivos de plátano no son aprovechados eficientemente por el cultivador, ya que su producción se basa principalmente en la comercialización o como opción alimenticia para el hogar, por lo que después de usar el fruto destinan lo restante (vástago y plátano descartado) como abono para la cosecha, por medio de su descomposición (Cadavid & Giraldo, 2011). En relación a esto, se han realizado diferentes investigaciones enfocados al desarrollo de nuevas tecnologías que utilicen los residuos o subproductos provenientes de cultivos, con el fin de disminuir la cantidad de residuos generados mediante la implementación de un proceso microbiológico degradativo (Casas & Sandoval, 2014).

La degradación anaerobia de materiales orgánicos como los residuos agroindustriales de los cultivos de plátano (vástago y plátano descartado) ha sido presentada como una tecnología apropiada para el aprovechamiento de estos residuos y la producción de energía a partir de la generación de biogás; de esta manera se puede determinar que la digestión anaerobia permite alcanzar dos objetivos principales a la vez, el manejo adecuado de los residuos y la producción de energía renovable (Guerrero, 2017), suministrando servicios energéticos, en sectores donde las redes de distribución nacional y local no pueden llegar, favoreciendo al sector socioeconómico y la preservación del medio ambiente (Serrato & Lesmes, 2016).

En el presente estudio se busca determinar la factibilidad del uso de residuos orgánicos generados por los cultivos de plátano como co-sustrato para la co-digestión anaerobia con excremento porcino, con el fin de identificar la capacidad de producción de biogás, para su uso como energía alternativa en diferentes sectores del país, en especial en el rural donde se presenta escasez del suministro energético.

2. Planteamiento del problema

Colombia posee una gran actividad agroindustrial, permitiendo generar productos de valor agregado con el fin de obtener nuevos ingresos y desarrollos significativos, no obstante, la situación energética genera un retraso en el desarrollo económico de las regiones donde no se cuenta con una conectividad a la red eléctrica. Las Zonas No-Interconectadas (ZNI) del país corresponden al 66% del territorio nacional, con el 4% de la población principalmente en zonas rurales o aisladas. Alrededor del 10% de la energía consumida en estas zonas corresponde a Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) como las energías fotovoltaicas, biomasa y minihidroeléctrica, mientras que el resto de consumo es suplido con generadores diésel para producción de energía eléctrica (Acosta & Pasqualino, 2014).

Se han realizado diferentes investigaciones a nivel nacional acerca del aprovechamiento de residuos agroindustriales con el propósito de ser reutilizados para la producción de energías renovables, biocombustibles, productos para consumo humano o animal y productos químicos como enmiendas o abonos (Peñaranda, Montenegro & Giraldo, 2018).

La puesta en marcha de nuevos procesos investigativos, ha llevado a disminuir la explotación de recursos naturales haciendo un uso eficiente de los residuos generados en la industria; esto también ayuda a reducir la contaminación y degradación de los ecosistemas, ya que el aprovechamiento de residuos o subproductos, evita la implementación de una inadecuada disposición final como incineración, uso de rellenos sanitarios o el vertimiento a fuentes hídricas (Peñaranda et al., 2018).

Estos residuos pueden ser usados directamente para la producción de energía mediante quemas o para la obtención de biocombustibles sólidos, como el carbón vegetal, briquetas o pellets, por medio de procesos termo-mecánicos para aumentar la densidad energética haciéndolos aptos para el consumo final de energía (FAO, 2014).

En el departamento del Meta en el año 2017 fueron sembradas 24.675 ha de las cuales 14.057 ha fueron cosechas de plátano equivalentes a 264.809 Ton del mismo, lo que representa un incremento del 18% con respecto al 2016 a nivel departamental y un 4% de la producción a nivel nacional (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2017).

El plátano tipo hartón (*Musa paradisiaca*) es uno de los cultivos con mayor producción en el departamento del Meta, debido a esto genera una gran cantidad de residuos orgánicos en los lugares donde se lleva a cabo el proceso de siembra, cosecha y venta, los cuales pueden ser aprovechados en diferentes procesos por las características físicas y químicas que poseen.

En los cultivos cuando se cosecha el racimo, solo se utiliza del 20 al 30% de su biomasa, quedando un 70 a 80% sin ser aprovechada, lo que ha generado una de las principales problemáticas ambientales, puesto que en la mayoría de los casos son incinerados o vertidos a las fuentes hídricas sin tratamiento previo, contribuyendo así a la degradación del ecosistema; no obstante, algunos productores aprovechan los residuos en la plantación en forma de abono verde y alimentación animal (Mazzeo, León, Mejía, Guerrero & Botero, 2010).

En general los residuos que se utilizan suelen ser aquellos provenientes de actividades agropecuarias como el estiércol animal y subproductos de cultivos, que reciben el nombre de sustratos.

2.1 Formulación entorno al problema

¿Cuál es la producción de biogás y el % de metano obtenido a partir de la co-digestión de excretas porcinas usando como co-sustrato el vástago y el plátano descartado (fruto con cáscara) resultante de la producción de plátano hartón (*Musa paradisiaca*)?

2.2 Formulación de la hipótesis

El proceso de digestión anaerobia de residuos orgánicos vástago, plátano descartado y excretas porcinas da como resultado un biopotencial de biogás similar al de otros sustratos de origen agrícola.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Determinar la factibilidad del uso de residuos orgánicos generados por los cultivos de plátano como co-sustrato para la co-digestión anaerobia con excremento porcino para la producción de biogás.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar las características físico-químicas del vástago y plátano descartado (fruto con cáscara) para el uso como co-sustrato y ayuda en la co-digestión.
- Determinar el biopotencial de biogás producido por el vástago y plátano descartado (fruto con cáscara) resultante de la producción platanera empleando diferentes cantidades en co-digestión con excretas porcinas.
- Comparar teóricamente el biopotencial de biogás de estos residuos, con otros residuos agrícolas usados para la producción de biogás.

4. Justificación

La composición de los residuos sólidos en Colombia está constituida en más del 50% por residuos orgánicos; por lo que el aprovechamiento de estos contribuye en gran medida a una disminución en la contaminación del medio ambiente (Jaramillo & Zapata, 2008). Gracias a esto, se logran procesos en los que se genere una sostenibilidad ambiental dando paso a diferentes proyectos que sean beneficiosos, tanto para el medio ambiente, como para la comunidad en especial en las zonas rurales donde el acceso a la red eléctrica es deficiente, es allí, donde puede ser implementado el uso de reactores rurales alimentados con excretas porcinas o bovinas, en los cuales se podría tener una mayor producción de biogás, al usarse sustratos agrícolas de mayor potencial en co-digestión (Rojas, Contreras, & Rojas, 2018).

En la búsqueda de la producción de biogás empleando reactores mediante la co-digestión, se han desarrollado investigaciones, en las cuales se experimentan con diferentes sustratos en los que no todos cuentan con una buena producción y rendimiento. El excremento animal (bovino o porcino) es usado como sustrato principal y como co-sustrato aquellos residuos orgánicos obtenidos de diversos procesos productivos, como residuos de la producción de azúcar, remolacha (2,18 L/L*d), residuos de yuca (2,05 L/L*d), residuos de comida (1,69 L/L*d), melaza (27,8 L/Kg SV*d), hojarasca de maíz (19,17 L/Kg SV*d), entre otros (González & Jurado, 2017); similar es el caso que se muestra en la producción de biogás a partir de banano de rechazo (2,24 L/L*d) (Guevara, Arenas, Mejía, & Peláez, 2011).

Los residuos orgánicos utilizados para la ejecución de este proyecto son recolectados del municipio de Fuente de Oro en el departamento del Meta, debido que allí se cuenta con la presencia de 14 asociaciones de agricultores para un total de 290 asociados, que se dedican a la siembra y cosecha de plátano (Secretaría de Medio Ambiente; Alcaldía de Fuente de Oro, 2019). Este municipio que forma parte de la región del Ariari considerada como despensa agrícola del departamento, produce una cantidad importante de residuos de la cosecha del plátano para la generación y producción de biogás, lo que puede ser utilizado para la práctica e implementación de energías alternativas y disminución del uso de combustibles fósiles. Además de esto, es una opción con garantía de rentabilidad, ya que no solo resuelve una problemática ambiental, volviéndola una alternativa viable que garantiza una fuente de energía renovable, confiable y más limpia, si no que ofrece un

ahorro económico al volverse autosustentable en energía eléctrica y calorífica (Garcés, Gutierrez, & Reyes, 2014).

Puesto a la poca información y la gran generación de residuos en los cultivos de plátano hace necesario mayor investigación del vástago y plátano descartado, para analizar si estos residuos son factibles como co-sustrato para la producción de biogás, siendo el excremento porcino el sustrato principal.

5. Alcance

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó como co-sustrato la mezcla de dos de los residuos resultantes del cultivo de plátano hartón: el vástago y plátano descartado (fruto con cáscara), y como sustrato principal las excretas porcinas.

El municipio con mayor producción de plátano hartón es Fuente de Oro, localizado al sur del Departamento del Meta, en la región denominada tradicionalmente del medio Ariari; cuenta con una extensión territorial de 628.79 Km², ubicado entre los puntos extremos 2°55' y 3°50'40" de latitud Norte y 72°58'42" y 74°03'22" de longitud Oeste de Greenwich, 359 m.s.n.m de altitud y una temperatura promedio de 26°C. Es por esto que la materia prima para la ejecución de este proyecto se obtuvo de este municipio, teniendo en cuenta que los resultados son válidos en lugares donde haya producción de plátano hartón.

El trabajo experimental se realizó en el laboratorio de Calidad de Aguas y de Conversión de Energía de la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio. La fase experimental se realizó en un tiempo aproximado de 4 meses.

6. Antecedentes

El biogás es un compuesto que se produce a partir de materia orgánica, por lo que se pueden aprovechar residuos orgánicos y brindar oportunidades de desarrollo tanto energético, como calorífico para la comunidad. Debido a esto desde hace muchos años se han venido realizando diferentes estudios y descubrimientos acerca de la aplicabilidad y uso del biogás.

A finales del siglo XVIII el físico italiano Alessandro Volta identificó por primera vez el metano (CH_4) como el gas inflamable en las burbujas que emergían de los pantanos. El metano obtuvo una importancia durante la segunda guerra mundial debido a la escasez de combustibles fosiles (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

En la década de los 60, en India, se implementaron tecnologías para una mayor eficiencia en la producción de biogás generado a partir del estiércol bovino, con el fin de obtener un aprovechamiento energético y la producción de biofertilizante. A comienzos de la década de los 70, en China, el gobierno nacional implusó programas para la construcción de biodigestores (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

Actualmente uno de los referentes en la producción de biogás lo contituyen varios países europeos, como Alemania, Dinamarca, España, entre otros. Europa es una de las regiones con mayor participación en la generación de biogás. Entre el año 2009 y el 2015 la cantidad de plantas de biogás en Europa se aumentó de 6.000 a 17.358. La tasa de incremento en la generación de biogás fue del 9% anual. Estas tasas de crecimiento son impresionantes, ya que su capacidad total instalada es 8.728 MWel (European Biogas Association, 2013). Alemania, primer país lider en producción de biogás, siendo la primera potencia europea con una capacidad instalada de 8.700 plantas de producción de biogás, y su desarrollo de la energía primaria que proviene del biogás; resulta principalmente de la producción de electricidad de pequeñas plantas a partir de la co-generación (Montaño, Corona, & Montelongo, 2009).

En el año 2016 en la Universidad de La Laguna en España, se realizó un trabajo de investigación donde se estudio la viabilidad que tenían los residuos agrícolas (plátanos y tomates) para la producción de biogás (Navarro, 2016).

En la ciudad de México, en el año 2015 se desarrolló la evaluación de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos putrescibles, este proceso se llevó a cabo en dos digestores que fueron alimentados con diferentes residuos orgánicos, con el fin de obtener el resultado del residuo que mayor potencial de producción de biogás generara (López, Quinto, Aguilar, & Garibay, 2015).

En la Universidad de Chiapas en México, la Facultad de Ingeniería en Tecnología Ambiental desarrolló un trabajo en el que se estudió factores como: la biodegradabilidad, la producción de metano y el comportamiento de poblaciones de eubacterias y arqueobacterias durante la digestión anaerobia de residuos de plátano, mango y papaya provenientes de la agroindustria (Pérez, Wong, Bello & Yanez, 2015).

En el 2018, la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Politécnica Salesiana en la ciudad de Quito-Ecuador, realizó la obtención de biogás a partir de residuos sólidos de cáscara de naranja provenientes de una industria de jugos a gran escala, mediante la utilización de un biodigestor anaerobio vertical semi-continuo (Guaminga, 2013).

Con respecto a la experiencia en esta área, en Colombia se pueden encontrar varias situaciones destacables. En el año 2011, en la ciudad de Medellín-Colombia, el grupo interdisciplinario de Estudios Moleculares de la Universidad de Antioquia realizó un estudio acerca de la obtención de etanol y biogás a partir de banano de rechazo debido a que la industria bananera de exportación en Colombia genera una importante cantidad de biomasa residual denominada banano de rechazo, con una producción de biogás de 2,24 L/L*d (Guevara et al., 2011). También, en la ciudad de Bogotá, la Universidad Nacional realizó una investigación respecto a la producción de biogás mediante la co-digestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para la utilización como fuente de energía (Cendales, 2011).

En el año 2012, se realizó un proyecto con el fin de poder convertir estos residuos o subproductos en fuente de energía para la región. El departamento del Meta cuenta con una tradición agrícola donde sobresalen diferentes productos como: la palma africana, arroz, frutales, plátano, y otros; los cuales son llevados a diferentes procesos de transformación, donde se obtienen principalmente biomasa (Nuñez, 2012).

En el 2016, en el departamento de Cundinamarca Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás, identificó los residuos de mayor aporte en el potencial de biogás los cuales son aquellos generados por actividades relacionadas con los cultivos de café, caña panelera, arveja, papa; excretas bovinas y avícolas (Montenegro, Rojas y Hernandez, 2016).

En el año 2017, la Universidad Pontifica Bolivariana en la ciudad de Medellín, realizó un trabajo en las zonas cafeteras de Antioquia, con el fin de conocer el aprovechamiento de la pulpa de café para la producción de biogás en un reactor flujo pistón. El rendimiento del proceso fue de 41,52 L de biogás por litro de pulpa de café alimentada al reactor (Londoño, 2017). En la ciudad de Cali, la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad ICESI realizó la evaluación del potencial de biogás a partir de residuos agroindustriales de la caña de azucar, el objetivo de este estudio fue determinar el potencial de producción de biogás de diferentes desechos agroindustriales de la caña de azúcar (bagacillo, miel, residuo agrícola de cosecha y vinaza), tanto individual como de sus combinaciones, para que a futuro puedan ser implementadas como sustrato para la producción de energía renovable en la región (Guerrero, 2017).

En el 2018 en la ciudad de Ibagué, se realizó un estudio sobre la biodegradación de la paja de arroz bajo la digestión anaeróbica, para mitigar los impactos ambientales causados por la quema ilegal de paja de arroz en campos rurales; la digestión anaeróbica de la paja de arroz podría ser una excelente alternativa para el tratamiento de este subproducto de la cosecha de arroz con cáscara. Los resultados demuestran una alta producción de biogás (410 L / kg SV) a 0,8 de relación Inóculo/Sustrato, con un contenido de metano superior al 70% (Garcia, Mirquez, & Hernandez, 2018).

En el 2019 en la ciudad de Bogotá se realizó una evaluación de la producción de biogás a partir de lodos residuales recolectados de una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), a través de la digestión anaerobia en dos reactores continuos de tanque agitado (CSTR) de 20L, con el objetivo de usar esta materia prima para producir energía renovable, y así poder determinar el potencial energético de la misma (Jaramillo & Tamayo, 2019).

En esta misma fecha, se realizó otro estudio en la ciudad de Oro-Ecuador, donde se diseñó un biodigestor para el aprovechamiento de biogás en la granja de explotación porcina y del mismo

modo aprovecharlo como combustible para el abastecimiento de quemadores de un sistema de calefacción para lechones (Apolo, 2019).

7. Marco de referencia

7.1 Marco Teórico

Los sustratos que son utilizados para procesos de digestión anaerobia se pueden clasificar en 4 clases según sus características como lo muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de sustratos para la digestión anaerobia.

Características	Clase	Tipo de Sustrato	Características Cuantitativas
Sólido	1	Basura Doméstica	> 20 % ST
		Estiércol Sólido	40-70 % SV
		Restos de Cosecha	100-150 g/L DQO
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	2	Heces Animales	5%-10% ST 4%-8% SV
Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos (SS)	3	Heces Animales de cría y levante diluido con agua de lavado	3-17 g/L DQO 1-2 g/L SS
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de agroindustrias	5-18 g/L DQO
		Aguas Negras	4-500 g/L DQO

Nota: Clasificación de sustratos para la digestión anaerobia. Por: MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011

Cultivo de plátano: El plátano pertenece a la familia de las Musáceas, son nativas del sudeste asiático, y comprende dos especies: *Musa cavendish* (bananos) y *Musa paradisíaca* (plátanos). Por su parte, las variedades de plátano Dominico-Hartón, Hartón y Dominico son las más cultivadas en el departamento del Meta, ya que han demostrado buena adaptación a sus condiciones agroecológicas como se muestra en la Tabla 2 (DANE & MinAgricultura, 2014).

Tabla 2. Condiciones agroecológicas favorables para el desarrollo de las variables más cultivadas.

Variedad	Temperatura (°C)	Precipitación (mm anuales)	Altitud (msnm)	pH suelo
Hartón	24-27	1.500-2.000	0-800	5,5-6,5
Dominico	20-30	1.500-2.000	0-1.400	5,5-6,5
Dominico-Hartón	15-32	1.500-2.000	0-2.000	5,5-6,5

Nota: Condiciones agroecológicas favorables para el desarrollo de las variables más cultivadas. Por: DANE & MinAgricultura, 2014

Residuos de los cultivos de plátano: Cuando se cosecha el racimo, solo se está utilizando del 20 al 30% de su biomasa, quedando de un 70 a 80% por utilizar, lo que ha generado una de las principales problemáticas ambientales, puesto que en la mayoría de los casos son incinerados o vertidos a los cauces receptores sin tratamiento previo, contribuyendo a la degradación del ecosistema; aunque, algunos productores aprovechan los residuos en la plantación en forma de abono verde y alimentación animal (Mazzeo et al., 2010).

El vástago o raquis es un material orgánico muy valioso, el cual no está siendo aprovechado al máximo; comúnmente, se utiliza como alimento para ganado, también puede ser desintegrado y aplicado al suelo donde será transformado en forma natural por los organismos del suelo y por las lombrices en humus, liberando los nutrientes que extrajo del suelo (Angarita, Ariza, Blanco, Noguera & Redondo, 2010). En lo que respecta al plátano descartado, en estado verde o maduro, representan el 50% del plátano producido y comercializado, lo que determina un alto volumen de producto comercializado a bajo costo. Lo anterior, está constituido por los plátanos que se deterioran por daños mecánicos (18,3%), y patológicos (23,9%) en los sitios de comercialización, al ser manipulados inadecuadamente (Mazzeo et al., 2010).

Cultivos de plátano en el Departamento del Meta: El departamento con mayor productividad a nivel nacional es el departamento del Meta, ya que tiene sembradas 19.890 hectáreas de las cuales 13.910 están en producción, estimada en 228.779 toneladas/año, con la variedad Hartón y Dominico-Hartón (MinAgricultura, 2018). Durante los años 2009 y 2013 ha habido un comportamiento creciente destacándose el año 2013, cuya producción aumentó un 12%, al pasar de 215.076 Ton en el año 2009 a 244.435 Ton en el 2013; siendo este el año en el que el municipio

de Fuente de Oro tuvo la mayor área sembrada de plátano con 4.500 ha (Alcaldía de Fuente de Oro-Meta, 2015).

Digestión anaerobia: La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo y degradativo en el que la materia orgánica (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de microorganismos que son sensibles o completamente inhibidos por el oxígeno o sus precursores (Guerrero, 2017).

El biogás contiene un alto porcentaje en metano, CH_4 (entre 50-70%), por lo que es susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, bien sólo o mezclado con otro combustible. El proceso controlado de digestión anaerobia es uno de los más idóneos para la reducción de emisiones de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y el mantenimiento y mejora del valor fertilizante de los productos tratados (IDAE, 2007).

La digestión anaerobia puede aplicarse, entre otros, a residuos ganaderos, agrícolas, así como a los residuos de las industrias de transformación de dichos productos. Entre los residuos se pueden citar purines, estiércol, residuos agrícolas o excedentes de cosechas, etc., Estos residuos se pueden tratar de forma independiente o juntos, mediante co-digestión (IDAE, 2007).

Fases de la digestión anaerobia

Hidrólisis: Al inicio del proceso anaerobio las grandes moléculas de biopolímeros son transformadas en monómeros y otros productos solubles (desintegración), como por ejemplo carbohidratos o ácidos grasos; los biopolímeros se dividen básicamente en carbohidratos, proteínas y lípidos, estas moléculas son divididas en azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga (LCFA) respectivamente durante la Hidrólisis (Rojas et al., 2018).

Acidogénesis: Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias acetogénicas (acético, fórmico, H_2) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente), que tienen que ser oxidadas en la siguiente etapa del proceso (Guaminga, 2013).

Acetogénesis: En esta etapa, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células; estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente (Guaminga, 2013).

Metanogénesis: En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores; los microorganismos metanogénicos son los responsables de la formación de metano y completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2 / CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

Las diferentes fases de la digestión anaerobia se pueden evidenciar en la Figura 1.

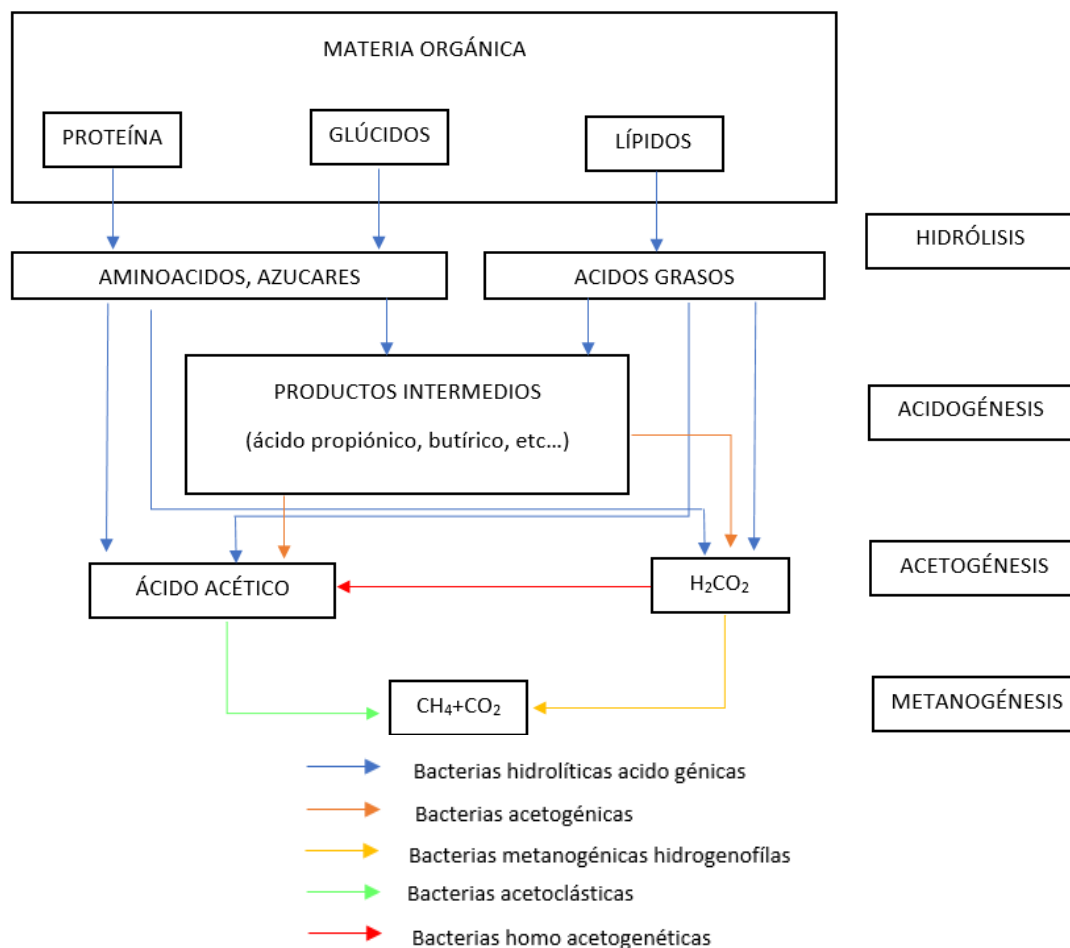


Figura 1. Proceso de digestión anaerobia. Por: MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011

7.2 Marco Conceptual:

La tecnología para producir biogás reproduce lo que ocurre en la naturaleza de manera espontánea. Para ello, se puede utilizar un tanque de almacenamiento en donde se agregan los residuos orgánicos que las bacterias anaerobias consumirán para satisfacer sus necesidades metabólicas, degradando la materia orgánica, produciéndose gas metano de características similares al gas natural (Flores & Acevedo, 2016). La biomasa para la producción de biogás hace referencia a la materia viva presente en la superficie terrestre, llamada biósfera. Los residuos que se generan a partir de procesos de transformación natural o artificial de la materia viva, también constituyen biomasa. Ésta es renovable debido a que forma parte del flujo natural y repetitivo de procesos en la naturaleza, siendo las plantas quienes inician los procesos con la fotosíntesis para captar la energía solar. La biomasa es indispensable para conservar y enriquecer la diversidad biológica y el suelo (Nuñez, 2012).

El biogás es una mezcla gaseosa que se encuentra formada principalmente por metano y dióxido de carbono, pero a la vez también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable. El biogás tiene propiedades específicas que se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Características generales del biogás.

Composición	55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Nota: Características generales del biogás. Por: MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011

Para la obtención biogás es de suma importancia tener en cuenta las variables que ayudan a su producción como lo es la **temperatura** de la mezcla, que en el reactor es un factor importante para

la eficiencia del proceso de digestión; la mayoría de las bacterias anaeróbicas funcionan mejor en el rango de 30 a 35°C y esta es la temperatura óptima para la producción de biogás; la temperatura en el tanque reactor siempre debe estar por encima de 20 °C, porque a temperaturas menores, se produce poco biogás y por debajo de 10° C la digestión cesa completamente (Silva, 2002). Además, los períodos de retención de 10 a 25 días para la mezcla en el tanque reactor son usuales para la mayoría de países tropicales. Si las temperaturas ambientes son altas, por ejemplo, en promedio entre 30 y 35° C, puede ser suficiente un período de retención más corto, de 15 días. En climas más fríos, son comunes periodos de retención más largos, de 80 a 90 días (Silva, 2002).

Los **niveles de pH** también afectan el proceso anaerobio cuando se encuentran fuera del rango óptimo. Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos. Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. El pH óptimo es entre 5,5 y 6,5 para acidogénicos, entre 7,8 y 8,2 para metanogénicos y para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6,8 y 7,4, siendo el pH neutro el ideal (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6,0 ni subir de 8,0. El valor del pH en el reactor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas. Los acidogénicos son significativamente menos sensibles a valores más extremos de pH (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

Los reactores son una alternativa práctica que tiene como finalidad aprovechar materia orgánica, (como estiércol de animales o residuos de cosechas o alimentos), la cual es mezclada con agua para que posteriormente pueda ser digerida por microorganismos. Básicamente consiste en un recipiente cerrado y hermético para evitar la entrada y salida de aire; así mismo para impedir fugas del biogás producido. Existen diferentes tipos de reactores debido a su complejidad y utilidad, es por esto que se clasifican según su operación y alimentación. Están los Continuos, discontinuos o de régimen estacionario y los semicontinuos, siendo estos dos últimos los empleados en el proyecto. El reactor semicontinuo tiene incorporado un sistema de agitación y es alimentado

frecuentemente. Este tipo es el más usado en el medio rural y los diseños más populares son el reactor Indiano y Chino (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

El **sustrato** es el factor más importante en el proceso anaerobio, ya que, si las condiciones son óptimas, determinará la cantidad de biogás producido y el porcentaje de gas metano. En primer lugar, la biodegradabilidad del sustrato influye en la velocidad del proceso y la calidad del biogás producido (Rojas et al., 2018).

Para la caracterización de los sustratos se tienen en cuenta 3 parámetros en función de su apariencia física, nivel de dilución, grado de concentración y características cuantitativas, como el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO), ya que esto son los factores determinantes para el proceso metanogénico por que lideran la producción de biogás (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

El **inóculo** es una suspensión de microorganismos que se trasportan a un ser vivo o a un medio de cultivo donde crece y se reproduce. La inclusión de este es un factor crucial en la operación del reactor, la calidad y cantidad del mismo son factores de suma importancia ya que definen la duración del período de arranque y desempeño del mismo, dado que es ahí donde la biomasa activa crece y adquiere las propiedades necesarias para la remoción de la materia orgánica y reducción en el tiempo de digestión. Este tiempo será corto si el inóculo posee células jóvenes y activas (Córdoba, Fernandez, & Santalla, 2014).

7.3 Marco Legal:

Para la implementación de energías alternativas en Colombia se encuentran las siguientes normas:

Ley 629 de 2000. 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 en el artículo 2 en el inciso 1 a 6 donde se establece el fomento de reformas apropiadas en los sectores pertinentes, con el fin de promover unas políticas y medidas que limiten o reduzcan las emisiones de los gases de efecto invernadero. Además, en el artículo 3 numeral 4 se establece las reducciones de gases de efecto invernadero en las categorías de suelos agrícolas y de cambio del uso de la tierra y silvicultura, ya que en el anexo A se tienen en cuenta actividades como quema

en el campo de residuos agrícolas, agricultura, aprovechamiento del estiércol y suelos agrícolas (Congreso de la República, 2000).

Ley 1665 de 2013. Es allí donde se aprueba el estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), donde se promueve el uso sostenible de las energías renovables (IRENA, 2013). Luego viene la **Ley 1715 DE 2014** por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, que tiene como objeto en el artículo 1 promover el desarrollo y la utilización de las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las Zonas No Interconectadas (ZNI) y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda. Además, en el artículo 17 que tiene como nombre *Biomasa Agrícola*, donde se establecerá planes de actuación con el fin de fomentar el aprovechamiento energético de biomasa agrícola y evitar el abandono, la quema incontrolada en la explotación o el vertimiento de los residuos agrícolas. (Congreso de la República, 2013).

Para el uso y aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos:

Decreto 596 de 2016 en el artículo 2.3.2.2.8.82. Requerimientos de los residuos sólidos para el aprovechamiento, se dice que, para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos biodegradables, hace referencia que el almacenamiento temporal no puede superar las 48 horas (Gobierno de la República, 2016).

8. Metodología

El siguiente diseño experimental fue realizado en los Laboratorios de la Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio. Por medio de estos análisis experimentales se investigó la factibilidad del co-sustrato para producir biogás en las condiciones locales.

8.1. Caracterización físico-química de los sustratos: Los sustratos utilizados (excretas porcinas, vástago y plátano descartado e inóculo) se caracterizaron mediante la revisión bibliográfica de la metodología para fracciones sólidas descritos en el manual Métodos Normalizados APHA (Standard Methods) donde se determinaron los parámetros y el método con el que se realizaron mencionados en la Tabla 4, y como se observar en las Figuras 2,3,4,5,6.

Tabla 4. Parámetros para caracterización de los sustratos.

Parámetro	Excretas porcinas	Co-sustratos	Inóculo	Método
Sólidos volátiles (%)	Si	Si	Si	Sólidos volátiles (SV)
Nitrógeno total	Si	No	No	Test de nitrógeno total
pH	Si	No	Si	Potenciométrico
Tamaño de la partícula	No	Si	No	Método directo
DQO	Si	Si	si	Flujo cerrado
Conductividad	No	No	Si	Potenciométrico

Nota: Parámetros para caracterización de los sustratos. Por: Quijano & Ramirez 2020



Figura 2. Montaje para la determinación de sólidos totales del inóculo. Por: Quijano & Ramirez 2020.



Figura 3. Montaje para la determinación de sólidos totales de las excretas. Por: Quijano & Ramirez 2020.



Figura 4. Montaje para la determinación de sólidos volátiles del inóculo, después de 505 °C. Por: Quijano & Ramirez 2020.



Figura 5. Montaje de sólidos volátiles de las excretas, después de 505 °C. Por: Quijano & Ramirez 2020



Figura 6. Tubos en termoreactor para pruebas de DQO y nitrógeno total. Por: Quijano & Ramirez 2020.

8.2 Experimentos para determinación de biopotencial de Biogás: La función de los experimentos en el laboratorio es determinar el biopotencial de biogás del co-sustrato y su comportamiento durante el proceso anaerobio. El diseño experimental se realizó como está representado en la figura 7. El microreactor consiste en un contenedor de 1 L, el cual se encuentra herméticamente sellado y conectado a un segundo contenedor con hidróxido de sodio (NaOH). El hidróxido tiene la función de adsorber el CO_2 del biogás. El biogás remanente (principalmente metano) fluye a un tercer contenedor donde desplaza un líquido inerte, para obtener una medición del gas producido a temperatura ambiente. El microreactor se mantuvo en régimen mesofílico (37°C), durante la digestión, la cual se dio por concluida, cuando el volumen diario producido fue menor al 1 % de la mayor cantidad diaria producida desde el inicio. Estos valores fueron posteriormente normalizados a 0°C y 1 atm, con el fin de estandarizar las muestras y ser comparadas con datos de cualquier otro lugar, donde las condiciones como temperatura y presión puedan generar sesgo en los resultados. Se realizaron duplicados de las muestras sin el contenedor de absorción de CO_2 , para obtener la cantidad de biogás y por relación calcular el % de metano producido. Se ejecutaron 3 corridas para obtener valores promedios de la producción de biogás, debido a la variabilidad de los resultados obtenidos de los co-sustratos



Figura 7. Montaje experimental para la determinación de biogás y metano a escala de laboratorio en microreactores tipo batch. Por: Quijano & Ramirez 2020

El montaje de los microreactores se realizó como se observa en la Tabla 5. Para garantizar la mezcla completa, se inició la primera corrida utilizando inóculo (bacterias anaerobias), obtenido de un reactor en operación y una porción de excretas porcinas, lo que proporciona una densidad y condiciones adecuadas para el completo contacto del co-sustrato y las bacterias anaerobias de una manera adecuada (Rojas et al., 2018).

Tabla 5. Cantidad de sustrato para los microreactores.

N°	Contenido	Inóculo	Excretas	Co-sustrato
1	Control (Absorción de CO ₂)	200 ml ¹	0	0
2	Control	200 ml ¹	0	0
3	Ex. Porcinas (Absorción de CO ₂)	200 ml	200 ml	0
4	Ex. Porcinas	200 ml	200 ml	0
5	Ex. Porcinas + Co-sustrato (Absorción de CO ₂)	200 ml	200 ml	1 g
6	Ex. Porcinas + Co-sustrato	200 ml	200 ml	1 g

¹Completadas con agua hasta 400 ml; ²Determinadas a partir de % SV obtenido en la caracterización.

Nota: Cantidad de sustrato para los microreactores. Por: Quijano & Ramirez 2019

8.3 Experimentos a escala piloto en reactor semicontinuo: En el Laboratorio de Conversión de Energía, se realizó el arranque de reactor a escala de laboratorio (Volumen total 8 L) alimentado con excretas porcinas (ver Figura 8 y Tabla 6). Este montaje se realizó 4 semanas antes del inicio de los experimentos de laboratorio para la determinación del biopotencial de biogás del co-sustrato, lo cual garantiza una fuente de bacterias adaptadas (inóculo) a las condiciones de operación locales. El rango de operación fue el de las temperaturas ambientales de la región, las cuales se encuentran en el régimen mesofílico (20-35°C). Posteriormente se realizó la operación de este reactor con el co-sustrato seleccionado para este estudio (residuos de plátano) como se observa en la Tabla 6, donde se estudió y se tuvieron en cuenta los problemas de operación de modo semicontinuo, como acumulación de residuos en el reactor, efecto de la flotabilidad de co-sustrato, fugas mecánicas, porcentaje de eficiencia en la digestión u otros problemas que se presentaron. Se analizó la composición del biogás producido (% CH₄) con los instrumentos de medición acoplados al reactor (desplazamiento de volumen), así como las otras variables mencionadas en la Tabla 4.

Tabla 6. Frecuencia de alimentación del reactor.

Corrida	Sustrato	Frecuencia de alimentación	Volumen Reactor (Liq)
1*	Excretas porcinas	Diaria	5-6L
2	Excretas porcinas + Co-sustrato	Cada 3 días	5-6L

**La frecuencia de alimentación de la corrida 1 corresponde al arranque inicial del reactor (cultivo del inóculo). Nota: Frecuencia de alimentación. Por: Quijano & Ramirez 2020.*

La cantidad de co-sustrato e inóculo añadido se estableció como se observa en la Tabla 7, esto con el fin de evitar una acidificación del reactor para lo cual se recomienda que el co-sustrato no exceda el 5% del volumen total del mismo.

Tabla 7. Cantidad de co-sustrato para el reactor.

Volumen Total de Reactor	Volumen de inóculo	Cantidad de co-sustrato
8 L	5-6 L	50g

Nota: Cantidad de co-sustrato para el reactor. Por: Quijano & Ramirez 2020.



Figura 8. Reactor semicontinuo tipo fed-batch. Por: Quijano & Ramirez 2020.

8.4 Comparación teórica del biopotencial de biogás de otros co-sustratos con el realizado experimentalmente: En esta fase se realizó una comparación bibliográfica para determinar la factibilidad de la producción de biogás que tienen los diferentes co-sustratos orgánicos como la pulpa de café, cascara de naranja y banano de rechazo, en relación al co-sustrato en estudio (vástago y plátano descartado), allí se normalizaron (ver Ecuación 1) los datos con el fin de poder realizar una comparación con estudios de otras partes del mundo.

$$V_o = V_1 * \left(\frac{((P_1 - P_w) * T_o)}{(P_o * T_1)} \right)$$

Ecuación 1. Normalización de datos.

V_o : Volumen de biogás normalizado (ml)

V_1 : Volumen de biogás medido a temperatura T_1 y presión P_1

P_1 : Presión a la que se midió el biogás, (mbar)

P_w : Presión de vapor del agua a la temperatura T_1 (mbar), específicamente a 37°C, constante en la incubadora

T_1 : Temperatura a la que se midió el biogás, temperatura ambiente (K)

P_o : Presión normal (1013,25 mbar)

T_o : Temperatura normal (273,15 K)

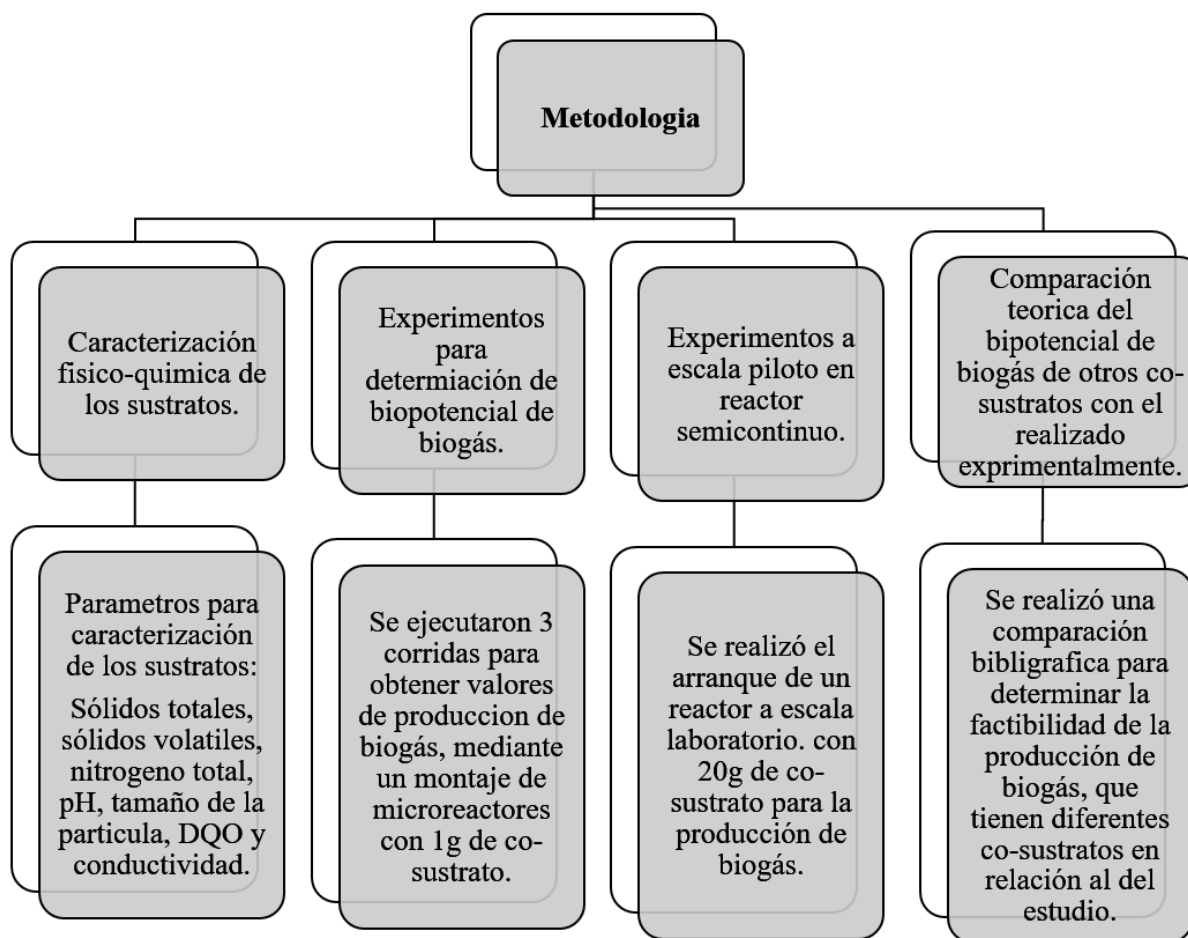


Figura 9. Diagrama metodológico. Por: Quijano y Ramirez 2020.

9. Resultados y análisis

9.1 Caracterización de excretas porcinas, plátano e inóculo.

9.1.1 Plátano

En la Tabla 8 se establecen los parámetros físico-químicos del vástago y plátano descartado como co-sustrato.

Tabla 8. Características físico-químicas del co-sustrato.

Sustrato	%SV	%ST	Humedad (%)	Nitratos (mg/L NO ₃)	Nitrito (mg/L)	Nitrógeno Total (mg/L N)	DQO (mg /L O ₂)
Plátano	80,52	24,35	75,65	135,26	0,13	0	779,97

Nota: Características físico-químicas del co-sustrato. Por: Quijano & Ramirez 2020.

Las muestras de plátano hartón que fueron utilizadas como co-sustrato para esta investigación se obtuvieron del municipio de Fuente de Oro-Meta (ver Figura 10), que se centra en el cultivo de alimentos entre ellos el plátano hartón, donde este cuenta con las condiciones climáticas adecuadas para la siembra, cosecha y post-cosecha del mismo, lo que hace de ese municipio fuerte en el sector agrícola, por la gran cantidad de residuos agrícolas de cosecha que se generan, en este caso de cultivos permanentes como lo es el plátano.

Los resultados de los sólidos volátiles y humedad del plátano, indican que sus características cumplen con los rangos establecidos en el manual de biogás, para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia, donde el 80,52% corresponde a sólidos volátiles, ya que estos están constituidos por 44 componentes orgánicos, los que teóricamente pueden ser convertidos en metano (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011), y un 75,65% de humedad, lo que resulta ser un sólido moderadamente húmedo, y a su vez permite una alta actividad microbiana dentro del sistema anaerobio.



Figura 10. Co-sustrato seleccionado en el municipio de Fuente de Oro-Meta. Por: Quijano & Ramirez 2020.

9.1.2 Excretas porcinas

Tabla 9. Características físico-químicas de sustrato principal.

Sustrato	%SV	%ST	Humedad (%)	Nitratos (mg/L NO ₃)	Nitrito (mg/L)	Nitrógeno Total (mg/L N)	DQO (mg /L O ₂)
Excretas 1*	39,43	49,79	50,21	23,83	0,07	21609,79	35,54
Excretas 2*	75,10	21,88	78,12	-**	-**	-**	428,77

*Excretas 1: Universidad de los Llanos; *excretas 2: Colonia Agrícola de Acacias. 2020.

**Debido a cierre de las instalaciones de la universidad causada por pandemia de COVID-19, no se pudieron finalizar los análisis.

Nota: Características físico-químicas de las excretas. Por: Quijano & Ramirez

La actividad porcina es una de las más predominantes a nivel nacional, puesto que se generan diferentes residuos como lo son las excretas, la cual han sido el sustrato principal en diferentes investigaciones, debido a que cuenta con nutrientes que favorecen el proceso de co-digestión.

Excretas 1: Obtenidas de cerdos de cría de la Universidad de Los Llanos (ver Figura 11), estas se utilizaron durante las corridas 1 y 2, las condiciones en las que se encontraban eran en corrales al aire libre y su alimentación era a base de cascarilla de arroz molida y pastizal.



Figura 11. Cerdos de cría de la Universidad de Los Llanos. Por: Quijano & Ramirez 2019

Excretas 2: Obtenida de cerdos de levante de la Colonia Agrícola de Acacias-Meta (ver Figura 12) utilizadas para la corrida 3, las condiciones en las en que se encontraban era en corrales cubiertos con superficie de cemento y su alimentación era a base de concentrado y lavaza.



Figura 12. Cerdos de levante de la Colonia Agrícola de Acacias. Por: Quijano & Ramirez 2020

La humedad en las excretas se ve influenciada por el habitat, debido a que los cerdos de cría se encontraban en corrales al aire libre, es por esto que la humedad de esas excretas es inferior al de los cerdos de levante, ya que se encontraban en corrales cubiertos y presentan alto porcentaje de humedad 78,12%, debido a la orina, dado que no contaban con un adecuado sistema de filtración y drenaje de líquidos.

Los sólidos totales son un factor importante para que el proceso de digestión anaerobia se lleve satisfactoriamente. Según el manual de biogás, para la óptima producción de biogás con excretas porcinas los ST deben estar entre 15-49% (FAO, 2011), siendo la Excreta 2 la más apropiada debido a que cuenta con 21,88% de ST y la Excreta 1 supera el rango propuesto con 49,79% (ver Tabla 9).

9.1.3 Inóculo

A continuación, se describen las características fisicoquímicas de los inóculos utilizados para en la presente investigación.

Tabla 10. Características físico-químicas de los inóculos empleados.

Sustrato	Origen	%SV	%ST	Humedad (%)	DQO (mg /L O ₂)
Inóculo 1*	La Cosmopolitana	27,33	0,14	99,22	3520,21
Inóculo 2*	Biorreactor Universidad Santo Tomás**	47,29	5,02	94,98	41803,74
Inóculo 3*	Biorreactor Universidad Santo Tomás**	80,55	2,44	97,55	29752,75

Inóculo1: finca agroturística La Cosmopolitana; Inóculo2*: Con excretas de la universidad de los Llanos; Inóculo 3*: Con excretas Colonia Agrícola de Acacias. **: Este biorreactor se especifica en el apartado 8.3(ver Figura 8)*

Nota: Características físico-químicas de los inóculos empleados. Por: Quijano & Ramirez 2020.



Figura 13. Reactor Finca Agroturística La Cosmopolitana. Por: Quijano & Ramirez 2020.

Para el montaje de los reactores se utilizaron 3 diferentes tipos de inóculo cultivados con diferentes sustratos. El Inóculo 1, fue obtenido del reactor de la Finca Agroturística La Cosmopolitana (ver

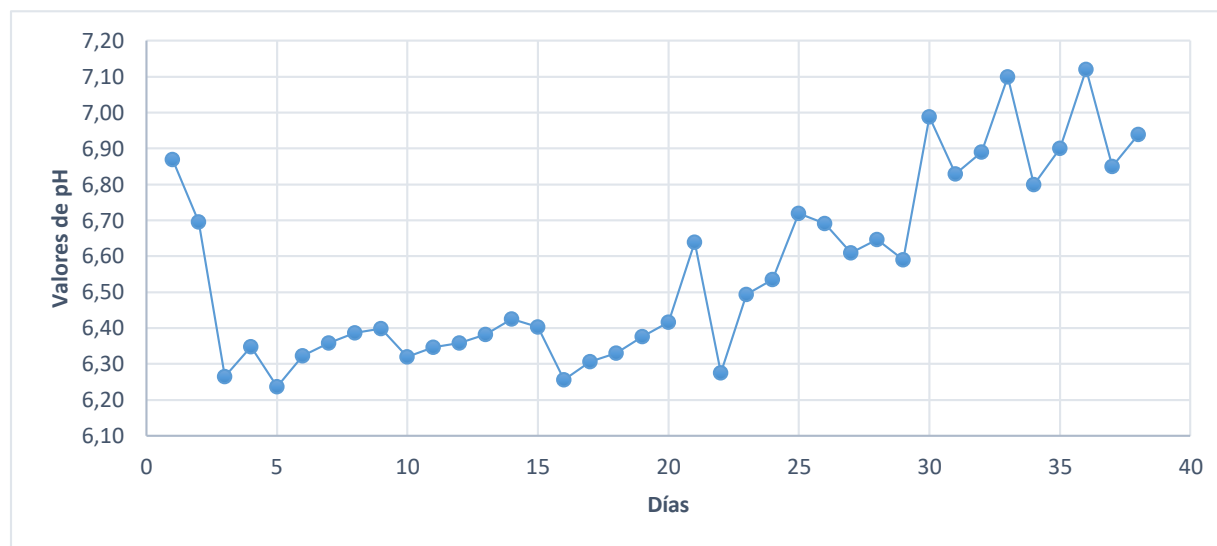
Figura 13), con el que se inició la corrida 1, debido a las características de este inóculo: 0,14% de ST, 27,33% de SV y DQO de 3520,21 mg/L O₂ (ver Tabla 10), se puede evidenciar que por el pequeño porcentaje de sólidos volátiles la carga microbiana es baja (RedBioLac, 2019). Por consiguiente, el proceso anaerobio es deficiente, por lo que la producción tanto de biogás como de metano se generó en pocas proporciones y hace que no sea significativa para este tipo de estudios, todo esto debido a que el reactor en el momento de la toma de la muestra presentaba inconsistencias en su funcionamiento, lo que afectó directamente el proceso de digestión anaerobia.

El Inóculo 2 fue cultivado durante 4 semanas con excretas de los cerdos de la Universidad de Los Llanos, en el reactor tipo bacht montado en la Universidad Santo Tomás (ver Figura 8), fue utilizado para la corrida 2 y que era alimentado con 500 ml de mezcla de excretas diariamente con una proporción 1:7 (ver Tabla 6) (Cubillos & Huertas, 2018), es decir por cada gramo de excretas se le agregaba 7 ml de agua, todo esto para asegurar el buen crecimiento de las bacterias con el fin de establecer condiciones óptimas del inóculo para la corrida y así mismo, las características físico-químicas de este inóculo fueron ST 5,02%, SV 47,29%, y DQO 41803,74 mg/L O₂ (ver Tabla 10).

El Inóculo 3 fue empleado en la corrida 3, de igual forma se cultivó en el mismo reactor que el Inóculo 2 (ver Figura 8), pero con excretas de la Colonia Agrícola del municipio de Acacias-Meta, teniendo un tiempo de cultivo de aproximadamente 3 semanas, de igual manera, con una alimentación continúa teniendo en cuenta la misma relación con la que se alimentaba el reactor para el Inóculo 2, para asegurar las mismas condiciones de crecimiento bacteriano, ya que la homogeneidad del inóculo en un reactor se determina a partir de la composición del sustrato de entrada (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011), además, teniendo en cuenta factores como la temperatura y la agitación. Los resultados de las características físico-químicas de este inóculo dieron SV 80,55%, 2,44% ST y 29752,75 mg /L O₂ de DQO (ver Tabla 10), lo que hace de este, apto para la producción de biogás y el crecimiento de los microorganismos, debido a su alto porcentaje de sólidos volátiles que son el principal componente para la conversión de metano (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

Durante el tiempo de cultivo del Inóculo 2 se realizó un seguimiento diario donde se evaluaban parámetros como pH y conductividad, el comportamiento de esto se puede observar a continuación:

9.1.3.1 pH



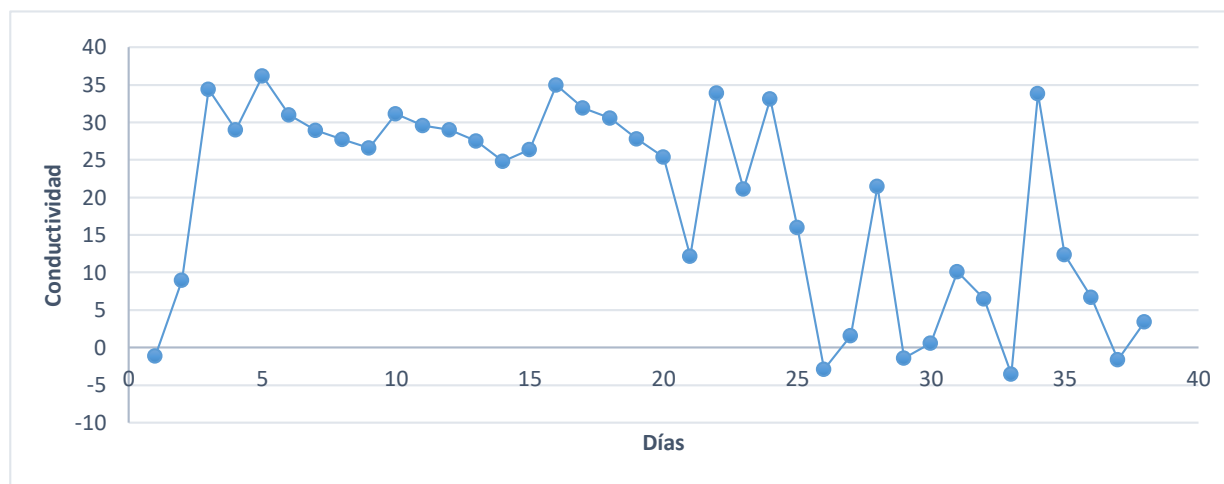
Grafica 1. Curva de la variación de pH del Inóculo 2. Por: Quijano & Ramirez 2020.

El pH es uno de los parámetros más importantes para llevar a cabo la digestión anaerobia dentro de un reactor, ya que estos valores indican las etapas en las que se encuentra el proceso de formación de microorganismos. Teóricamente se dice que el rango entre 5,5-6,5 permite el óptimo desarrollo de microorganismos acidogénicos, y entre 6,8-7,4 para cultivos mixtos (metanogénicos y acidogénicos) (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

La Grafica 1 indica las variaciones de pH durante el proceso de digestión anaerobia, en los primeros 20 días de operación en el reactor agitado, se presenta la etapa de acidogénesis, con valores obtenidos entre 6,24 y 6,49, cumplimiento con los valores óptimos para el desarrollo de microorganismos acidogénicos, de la misma manera se observa que entre los días 30 al 39 estos niveles de pH aumentan debido a la transformación a metanogénicos, convirtiéndolo en un cultivo mixto, ideal para la actividad microbiana.

Es importante resaltar que estas variaciones son debido a la alimentación que se realizaba diariamente al reactor lo que hacía que los ácidos decrecieran cuando se le agregaba sustrato nuevo, ya que este contenía materia orgánica no descompuesta.

9.1.3.2 Conductividad



Gráfica 2. Curva de la variación de la conductividad del Inóculo 2. Por: Quijano & Ramirez 2020.

En la gráfica anterior se aprecia el consumo de las sales minerales presentes por parte de las bacterias a medida que avanza el proceso de digestión en el reactor agitado, de igual forma hace referencia a la estabilidad de la masa orgánica y la transformación de la misma en bioabono. Los puntos altos de la gráfica representan los días en los cuales era alimentado el reactor, allí ocurría una estabilización de los ácidos que se formaban durante el proceso. Estos parámetros indican el buen estado del proceso anaerobio en este reactor y la disponibilidad de bacterias anaerobias para el montaje de los microreactores tipo batch, a partir de inóculo extraído del mismo.

9.2 Análisis de la producción de biopotencial de biogás y metano de las corridas.

Para determinar la cantidad de biogás y metano de los sustratos en co-digestión, se realizaron 3 corridas según el montaje expuesto en la Figura 7, cada una con un tiempo de retención de 20 días, 1g de co-sustrato equivalente a 0,1963g SV e inóculos de diferentes fuentes de origen, que permanecieron en una incubadora a 37 °C para mantener un régimen mesofílico, óptimo para el

desarrollo del proceso anaerobio. Adicionalmente se registraron datos de variables ambientales: temperatura y presión, a partir de la Estación Meteorológica del Aeropuerto Vanguardia ubicado en la ciudad de Villavicencio-Meta, esto para normalizar los datos y ser utilizados en comparaciones a nivel mundial con relación a este tipo de estudios.

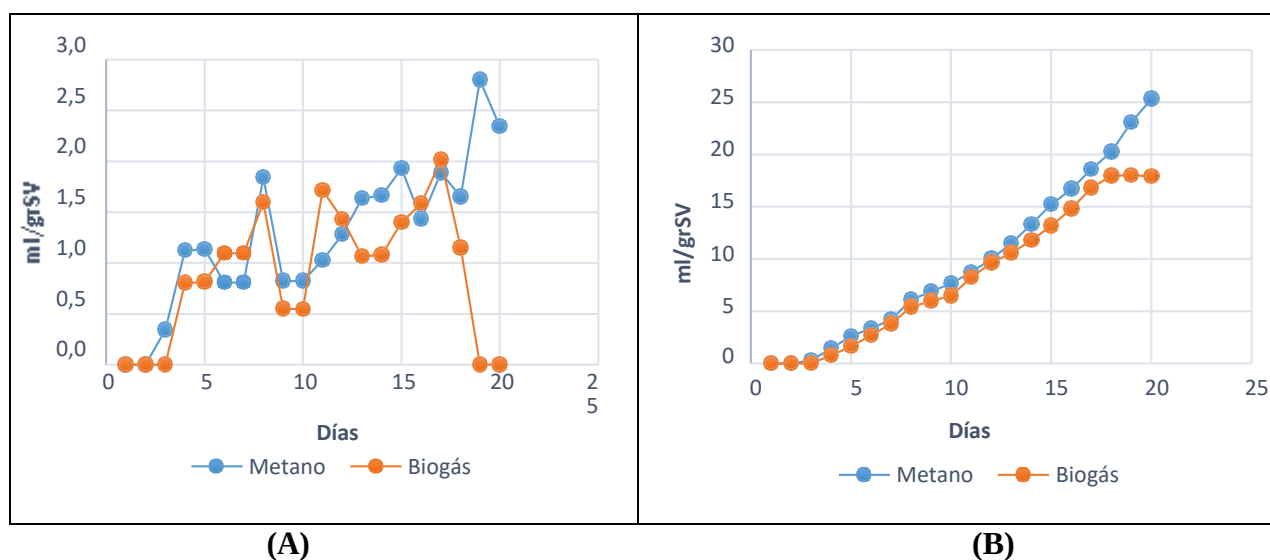
La medición de volumen de biogás se realizó mediante un seguimiento diario a una hora establecida, para lograr conocer el desplazamiento del líquido. Una vez finalizada cada corrida se realizaron gráficos con el fin de analizar las variaciones que tenían los diferentes microreactores, frente a la producción de biogás y metano de los sustratos utilizados (excretas porcinas y plátano). En cuanto a los microreactores que contenían solo inóculo que eran los de control, no se percibió desplazamiento en ninguna de las tres corridas a pesar de que se utilizaron 3 inóculos diferentes. Esto debido a que no fueron alimentados con sustrato nuevo, por lo que no fue necesario ajustar los volúmenes de los demás microreactores con inóculo+sustrato.

- **Corrida 1**

Tabla 11. (A) Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del sustrato excretas corrida 1.

(A)			(B)		
DATOS DIARIOS NORMALIZADOS			DATOS ACUMULADOS NORMALIZADOS		
Días	Metano	Biogás	Días	Metano	Biogás
1	0	0	1	0	0
2	0	0	2	0	0
3	0,339	0	3	0,339	0
4	1,123	0,805	4	1,457	0,805
5	1,132	0,811	5	2,601	1,622
6	0,806	1,095	6	3,392	2,707
7	0,807	1,097	7	4,204	3,808
8	1,839	1,594	8	6,070	5,426
9	0,825	0,550	9	6,877	5,960
10	0,821	0,548	10	7,667	6,480
11	1,026	1,716	11	8,746	8,241
12	1,281	1,433	12	9,986	9,635
13	1,636	1,066	13	11,470	10,554
14	1,660	1,082	14	13,299	11,791
15	1,930	1,398	15	15,196	13,159
16	1,434	1,586	16	16,686	14,794
17	1,890	2,012	17	18,565	16,797
18	1,650	1,146	18	20,261	17,984
19	2,799		19	23,078	18,001
20	2,343		20	25,297	17,904

.Nota: Datos diarios normalizados y diarios acumulados normalizados del sustrato excretas corrida 1. Por: Quijano & Ramirez 2020

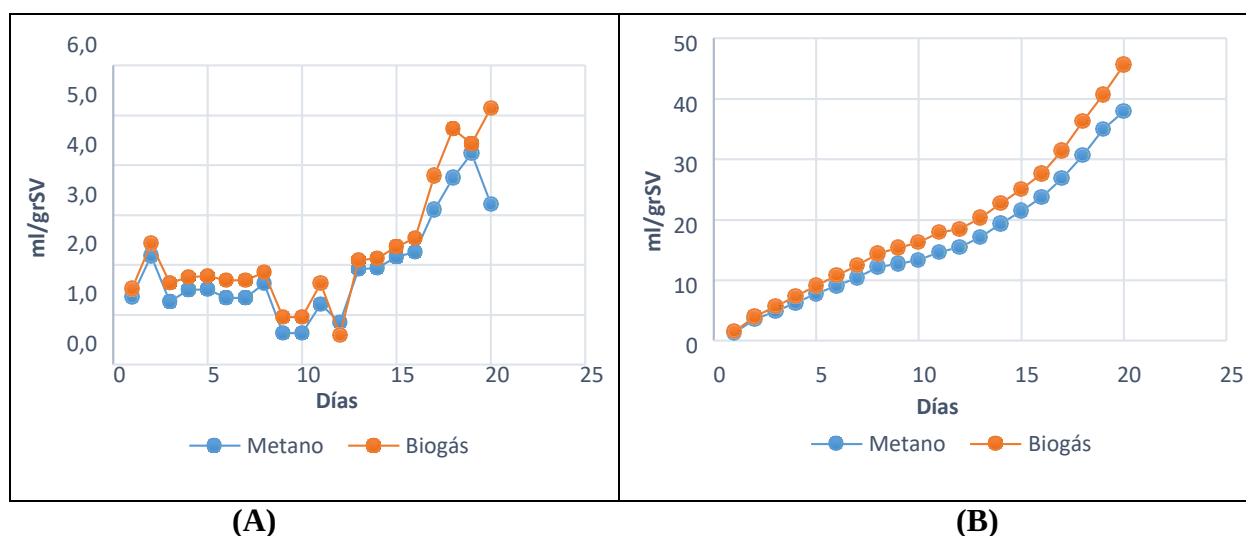


Gráfica 3. (A) Curva de producción diaria y (B) diaria acumulada de biogás y metano del sustrato excretas en la corrida 1. Por: Quijano & Ramirez 2020.

Tabla 12. (A) Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del co-sustrato vástago y plátano descartado corrida 1.

(A)			(B)		
DATOS DIARIOS NORMALIZADO			DATOS ACUMULADOS NORMALIZADO		
Días	Metano	Biogás	Días	Metano	Biogás
1	1,358	1,518	1	1,358	1,518
2	2,184	2,434	2	3,556	3,969
3	1,264	1,636	3	4,849	5,637
4	1,496	1,760	4	6,278	7,320
5	1,508	1,774	5	7,836	9,151
6	1,337	1,690	6	9,127	10,787
7	1,339	1,692	7	10,478	12,495
8	1,629	1,851	8	12,174	14,425
9	0,635	0,960	9	12,773	15,343
10	0,632	0,955	10	13,346	16,226
11	1,214	1,628	11	14,652	17,967
12	0,854	0,589	12	15,437	18,472
13	1,915	2,103	13	17,117	20,294
14	1,943	2,134	14	19,311	22,726
15	2,158	2,364	15	21,422	25,033
16	2,255	2,535	16	23,755	27,661
17	3,107	3,785	17	26,848	31,428
18	3,750	4,724	18	30,664	36,230
19	4,241	4,433	19	34,933	40,697
20	3,219	5,144	20	37,965	45,622

. Nota: Datos diarios normalizados y diarios acumulados normalizados del co-sustrato vástago y plátano descartado corrida 1. Por: Quijano & Ramirez 2020



Grafica 4. (A) Curva de producción diaria y (B) diaria acumulada de biogás y metano del co-sustrato vástago y plátano descartado en la corrida 1. Por: Quijano & Ramirez 2020.

En la curva de producción diaria del plátano (Gráfica 4A) se puede evidenciar que, para la producción de biogás y metano, los valores máximos fueron durante los días del 13 al 20, para metano con una mayor producción aproximadamente de 22,588 ml/g SV siendo el día 18 el valor más alto con 3,750 ml/g SV y para biogás con una mayor producción aproximadamente de 27,222 ml/g SV, siendo el día 20 el valor más alto durante el tiempo de retención.

En la curva de producción diaria de excretas (Gráfica 3A), se observa un comportamiento inestable en la producción de biogás debido que en algunos puntos la producción de metano era mayor, lo que se pudo deber a fallas experimentales en la absorción de CO₂. El día 19 presentó el valor más alto para la producción de metano con 2,799 ml/g SV y el día 17 el mayor valor para la producción de biogás con 2,012 ml/g SV. Es por esto, que esta corrida no se considera confiable debido a las condiciones en la que se encontraba el inóculo y a las fugas que presentaban los microreactores que contenían los sustratos en experimentación. Sin embargo, la tendencia de producción de biogás

en general presenta el comportamiento esperado, al ser los residuos de plátano un co-sustrato con alto contenido de carbohidratos de origen vegetal, la mayor parte de la producción de biogás se produjo a partir de la segunda semana de digestión.

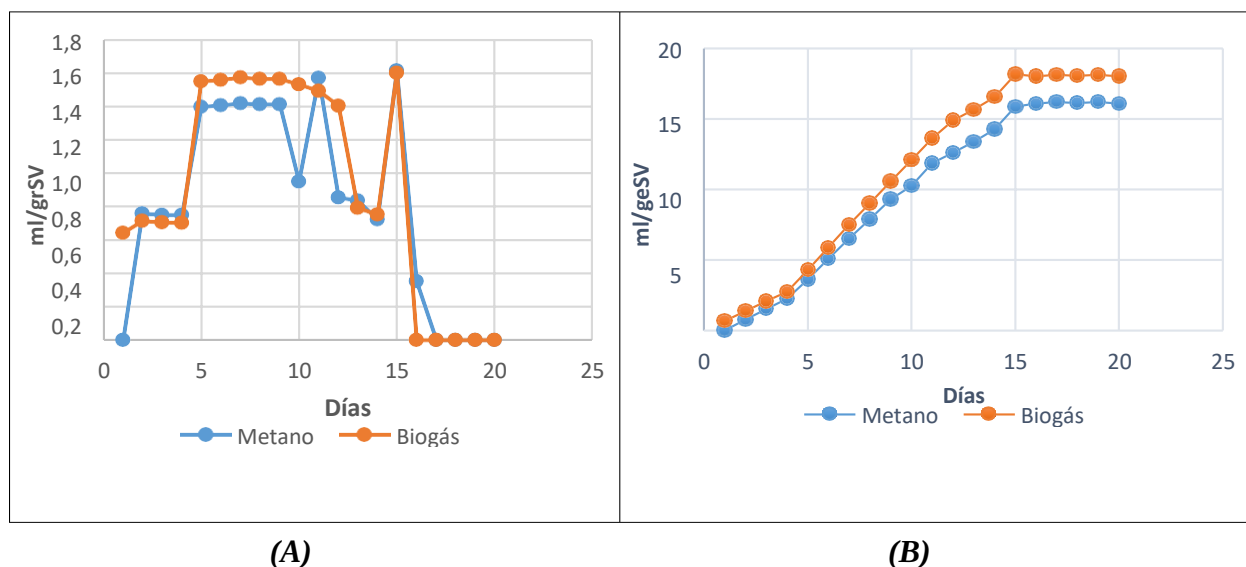
En la curva acumulada referente al co-sustrato plátano, presenta un crecimiento significativo desde el día 14, tanto en la producción de biogás, como en la de metano; en cuanto a la curva de excretas, el metano mantiene su producción estable y creciente siendo mayor a la producción del biogás, donde en esta los días 19 y 20 no presentaron producción, debido a que no se encontraba materia disponible para degradar.

- **Corrida 2**

Tabla 13. (A) Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del sustrato excretas corrida 2.

(A)			(B)		
DATOS DIARIOS NORMALIZADOS			DATOS ACUMULADOS NORMALIZADOS		
Días	Metano	Biogás	Días	Metano	Biogás
1	0	0,639	1	0	0,639
2	0,757	0,711	2	0,757	1,360
3	0,748	0,702	3	1,496	2,045
4	0,747	0,701	4	2,240	2,743
5	1,396	1,548	5	3,626	4,279
6	1,404	1,556	6	5,051	5,860
7	1,417	1,571	7	6,513	7,483
8	1,410	1,563	8	7,893	9,011
9	1,409	1,562	9	9,294	10,565
10	0,949	1,530	10	10,235	12,086
11	1,569	1,492	11	11,856	13,640
12	0,852	1,400	12	12,588	14,902
13	0,835	0,789	13	13,390	15,652
14	0,721	0,752	14	14,249	16,565
15	1,613	1,597	15	15,881	18,185
16	0,350	0	16	16,092	18,026
17	0	0	17	16,181	18,125
18	0	0	18	16,124	18,062
19	0	0	19	16,190	18,136
20	0	0	20	16,080	18,012

Nota: Datos diarios normalizados y diarios acumulados normalizados del sustrato excretas corrida 2. Por: Quijano & Ramirez 2020.

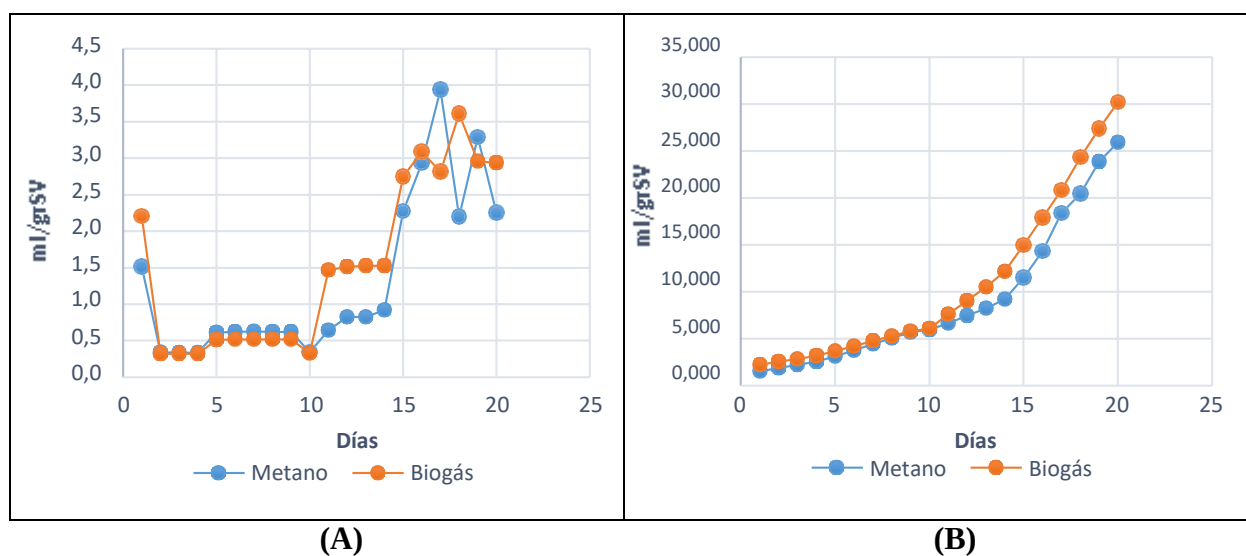


Gráfica 5. (A) Curva de producción diaria y (B) diaria acumulada de biogás y metano del sustrato excretas en la corrida 2. Por: Quijano & Ramirez 2020.

Tabla 14. (A) Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del co-sustrato vástago y plátano descartado corrida 2.

(A)			(B)		
DATOS DIARIOS NORMALIZADOS			DATOS ACUMULADOS NORMALIZADOS		
Días	Metano	Biogás	Días	Metano	Biogás
1	1,515	2,206	1	1,515	2,206
2	0,343	0,324	2	1,882	2,564
3	0,339	0,320	3	2,197	2,851
4	0,339	0,319	4	2,533	3,166
5	0,616	0,513	5	3,137	3,665
6	0,619	0,516	6	3,774	4,202
7	0,625	0,521	7	4,433	4,761
8	0,622	0,518	8	5,035	5,257
9	0,621	0,518	9	5,651	5,770
10	0,340	0,325	10	5,987	6,090
11	0,639	1,471	11	6,656	7,593
12	0,824	1,515	12	7,412	9,030
13	0,821	1,526	13	8,214	10,532
14	0,919	1,526	14	9,218	12,167
15	2,271	2,745	15	11,501	14,929
16	2,927	3,089	16	14,328	17,888
17	3,934	2,810	17	18,341	20,796
18	2,196	3,611	18	20,473	24,335
19	3,286	2,960	19	23,842	27,394
20	2,249	2,940	20	25,928	30,147

Nota: Datos diarios normalizados y diarios acumulados normalizados del co-sustrato vástago y plátano descartado corrida 2. Por: Quijano & Ramirez 2020.



Gráfica 6. (A) Curva de producción diaria y (B) diaria acumulada de biogás y metano del co-sustrato vástago y plátano descartado en la corrida 2. Por: Quijano & Ramirez 2020.

Las Gráficas 5 y 6, hacen referencia a la producción de biogás y metano diario y acumulado respecto al tiempo de retención de 20 días. Las curvas diarias, que se generaron permiten identificar el comportamiento de la producción de biogás de las excretas y el plátano, los cuales presentaron un rápido inicio desde el día 1.

El plátano presentó una mayor producción de metano en los días del 15 al 20 con un valor aproximado de 16,863 ml/g SV , siendo el día 17 el de mayor producción con 3,944 ml/g SV ; en cuanto a la producción de biogás, al igual que el metano, sus mayores valores se presentaron en los mismos días con un valor aproximado de 18,155 ml/g SV , pero en éste, el día 18 fue el de mayor producción con 3,611 ml/g SV .

Las excretas presentaron una producción estable de metano durante los días del 5 al 9 con un promedio de 1,407 ml/g SV y el día de mayor producción fue el 15 con 1,613 ml/g SV ; respecto a la producción de biogás, en esta demostró una estabilidad durante los días del 5 al 11 con un promedio de 1,546 ml/g SV , siendo también el día 15 el de mayor producción con 1,597 ml/g SV .

Se pudo evidenciar que la máxima producción de biogás y metano respecto al plátano fue al finalizar la corrida, en comparación con la producción estable en las excretas que fue en la mitad del tiempo de retención. Esto es debido al origen del sustrato, las excretas porcinas al estar semidegradadas y ser el producto de la digestión alimenticia del cerdo, se encuentran más degradadas

en comparación con los restos de plátano, que vienen directamente de la planta desechada, sin ningún tipo de degradación previa, es por esto que necesitan un mayor tiempo por parte de las bacterias anaerobias para ser transformada la materia orgánica.

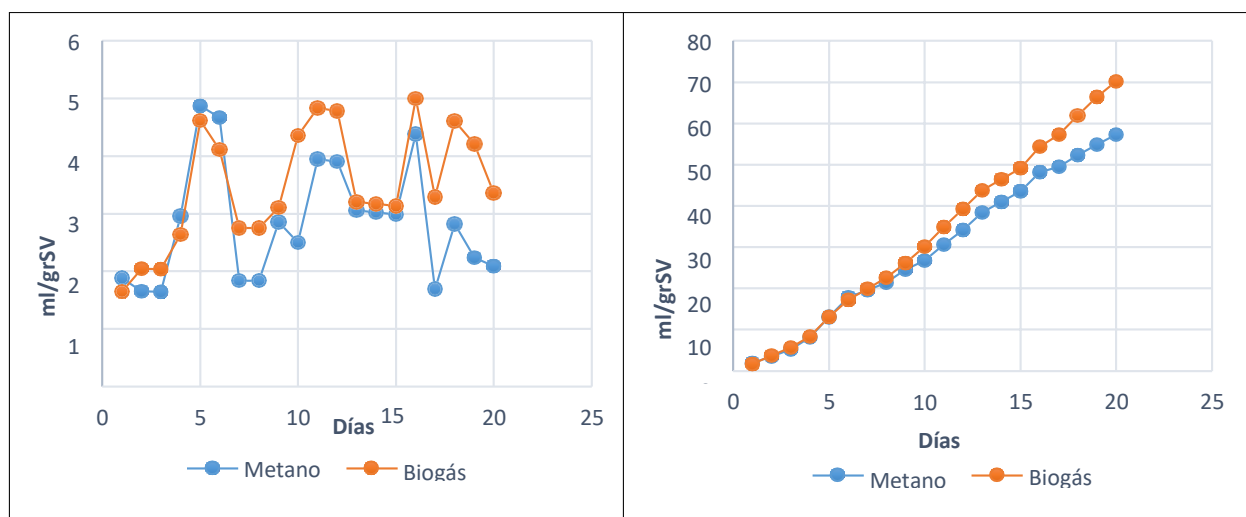
Mediante las curvas acumulativas, se logra evidenciar el comportamiento que presentó la producción durante toda la corrida; en la curva del plátano (ver Gráfica 6B) se identifica un similar comportamiento en cuanto a biogás y metano presentando un incremento en su producción en el día 14 aumentando así hasta el día 20 dándole fin a la corrida. En cuanto a la curva de excretas (ver Gráfica 5B), se identifica que aproximadamente en el día 15 se interrumpió la producción de biogás, asumiéndose que la degradación del sustrato finalizó.

- **Corrida 3**

Tabla 15. (A) Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del sustrato excretas corrida 3.

(A)			(B)		
DATOS DIARIOS NORMALIZADOS			DATOS ACUMULADOS NORMALIZADOS		
Días	Metano	Biogás	Días	Metano	Biogás
1	1,883	1,650	1	1,88	1,65
2	1,654	2,049	2	3,54	3,70
3	1,646	2,040	3	5,17	5,73
4	2,966	2,642	4	8,16	8,39
5	4,874	4,621	5	13,07	13,05
6	4,673	4,112	6	17,79	17,21
7	1,838	2,756	7	19,53	19,87
8	1,833	2,750	8	21,32	22,58
9	2,854	3,110	9	24,55	26,09
10	2,497	4,360	10	26,78	30,16
11	3,949	4,833	11	30,64	34,90
12	3,907	4,781	12	34,21	39,30
13	3,060	3,208	13	38,42	43,82
14	3,024	3,169	14	40,98	46,46
15	2,990	3,135	15	43,52	49,09
16	4,383	4,999	16	48,14	54,36
17	1,691	3,293	17	49,52	57,29
18	2,825	4,606	18	52,34	61,90
19	2,241	4,211	19	54,81	66,38
20	2,092	3,365	20	57,27	70,18

Nota: Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del sustrato excretas corrida 3 Por: Quijano y Ramirez 2020



(A)

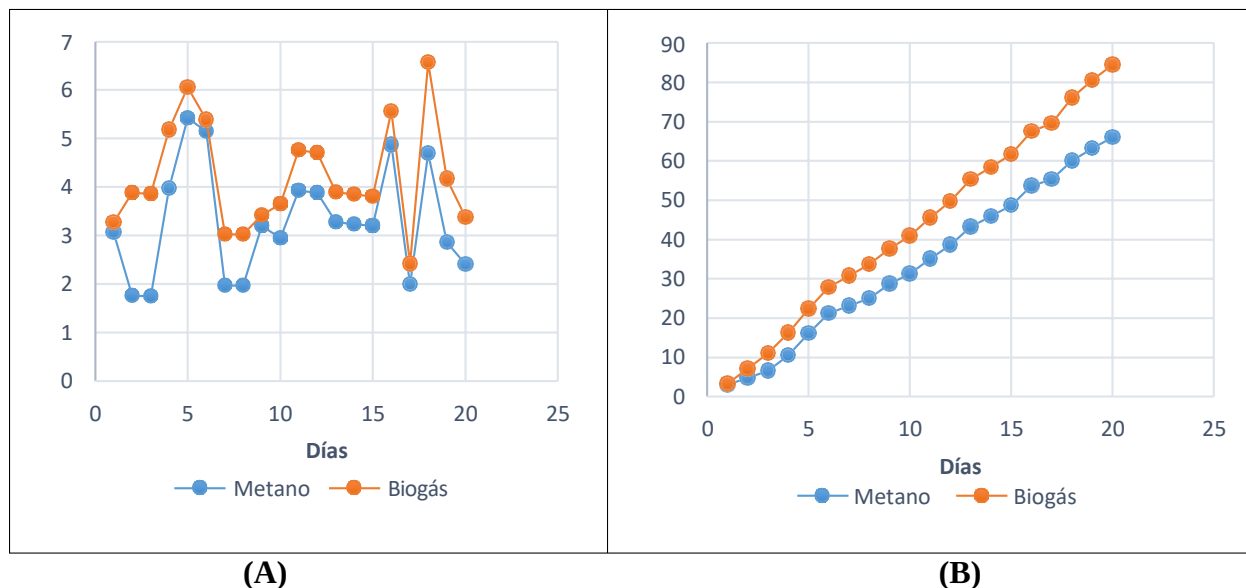
(B)

Gráfica 7. (A) Curva de producción diaria y (B) diaria acumulada de biogás y metano del sustrato excretas en la corrida 3. Por: Quijano & Ramirez 2020.

Tabla 16. (A) Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del co-sustrato vástago y plátano descartado corrida 3.

(A)			(B)		
DATOS DIARIOS NORMALIZADOS			DATOS ACUMULADOS NORMALIZADOS		
Días	Metano	Biogás	Días	Metano	Biogás
1	3,064	3,271	1	3,064	3,271
2	1,760	3,882	2	4,831	7,160
3	1,752	3,865	3	6,562	10,995
4	3,968	5,176	4	10,559	16,219
5	5,424	6,065	5	16,029	22,354
6	5,146	5,390	6	21,229	27,818
7	1,971	3,026	7	23,085	30,694
8	1,967	3,019	8	25,001	33,645
9	3,196	3,424	9	28,641	37,667
10	2,953	3,647	10	31,280	40,902
11	3,930	4,760	11	35,106	45,527
12	3,887	4,709	12	38,612	49,742
13	3,274	3,893	13	43,181	55,304
14	3,234	3,846	14	45,895	58,483
15	3,199	3,804	15	48,592	61,648
16	4,868	5,564	16	53,723	67,545
17	1,986	2,418	17	55,356	69,519
18	4,698	6,563	18	60,054	76,083
19	2,862	4,163	19	63,178	80,577
20	2,410	3,376	20	66,007	84,488

Nota: Datos diarios normalizados y (B) diarios acumulados normalizados del co-sustrato vástago y plátano descartado corrida 3 Por: Quijano & Ramirez 2020.



Gráfica 8. (A) Curva de producción diaria y (B) diaria acumulada de biogás y metano del co-sustrato vástago y plátano descartado en la corrida 3. Por: Quijano & Ramirez 2020.

Las curvas de producción diaria de biogás y metano para ambos casos presentan altas variaciones, por consiguiente, se puede observar que en esta corrida los valores de producción tanto para biogás como para metano oscilan en un rango mayor a 1 y menor a 6 ml/g SV. Como se evidencia en las Gráficas 8A y 8B, la producción de biogás en el plátano el día 18 obtuvo el mayor valor de producción con 6,563 ml/g SV, en cuanto a la producción de metano el mayor valor se presentó el día 5 con 5,424 ml/g SV; en contraste con la producción diaria de biogás de las excretas, se evidencia que durante todo el tiempo de retención (20 días), los valores de producción fueron altos siendo el día 1 el más bajo con 1,650 ml/g SV y el más alto con 4,999 ml/g SV, respecto a la producción de metano los valores fueron inferiores y durante los días del 13 al 15 la producción fue estable con un total aproximado de 9,74 ml/g SV, a comparación de los valores desplazados de metano, donde los días del 1 al 6 nos arrojó mayor cantidad de biogás, esto debido a que el sistema se encontraba en proceso de estabilización.

Las curvas acumuladas para la producción de biogás y metano para el sustrato y co-sustrato (Figura 8A y 8B), presentaron un crecimiento exponencial y estable lo cual lo hace significativo a lo largo de la medición, evidenciándose una mayor producción de biogás respecto al metano.

Esta corrida se considera la mejor respecto a las anteriores ya realizadas, debido a que ésta presentó mayor producción tanto de biogás como de metano durante el tiempo de retención (20 días); el inóculo (Inóculo 3) y las excretas obtenidas de la Colonia Agroindustrial de Acacias- Meta, debido a sus condiciones y características fisicoquímicas favorables, permitieron la óptima producción de biogás y metano para el sustrato y co-sustrato (excretas y plátano).

De acuerdo a los datos obtenidos de las 3 corridas realizadas, se determinó el biopotencial de biogás y el % de metano del co-sustrato.

Tabla 17. Biopotencial de biogás y % de metano de las 3 corridas realizadas.

Corridas	Gramos de plátano (g SV)	Proporción de metano que produce el plátano (%)	Biopotencial de biogás del plátano (ml/g SV)
1	0,1963	83,21*	838,88*
2	0,1963	86*	377,45*
3	0,1963	78,12*	427,21*

**Ver anexo C*

Nota: Biopotencial de biogás y % de metano de las corridas realizadas Por: Quijano & Ramirez 2020.

En la Tabla 17 se puede evidenciar la proporción de metano y el biopotencial energético del plátano en co-digestión mezclado con otros sustratos y así poder ver la factibilidad que tiene este tipo de residuos para la producción de biogás. Este proceso se realizó para cada una de las corridas con el fin de determinar el valor más acertado para poder llevar a cabo este tipo de procesos. La primera corrida presentó errores experimentales en la medición, por lo que no se toma para el cálculo de potencial de biogás. Las corridas 2 y 3 presentan un promedio de biopotencial de biogás de 402,33 ml/g SV y 82% de metano. Este valor es muy similar al obtenido a otros co-sustratos de la misma naturaleza (ver Tabla 18).

Tabla 18. Biopotencial de biogás de co-sustratos orgánicos.

Co-sustrato	Biopotencial de biogás (ml/g SV)
Maíz	450-700 ml/g SV
Cebada	550-680 ml/g SV
Paja	550-620 ml/g SV
Vástago y plátano descartado	402,33 ml/g SV

Nota: Biopotencial de biogás de co-sustratos orgánicos Por: FNR, 2004

9.3 Producción instantánea de biogás en reactor semicontinuo a escala piloto.

Para evidenciar el comportamiento con mayor cantidad de sustrato, se realizó una digestión anaerobia en un reactor de vidrio de 8 L agitado, donde se realizaron 2 corridas de las cuales no se obtuvieron resultados debido a fallas en el mismo como fugas, por consiguiente, se realizó un nuevo montaje (ver Figura 14) que contaba de dos reactores de plástico agitados cada uno con una capacidad de 4 L. El Reactor 1 contenía 2,5 L de inóculo (mezcla de excretas porcinas con agua) y el Reactor 2 al igual que el Reactor 1 contenía 2,5 L de inóculo adicionándole 20 g de residuos de plátano (ver Tabla 19), cada uno de ellos con un tiempo de retención de 7 días.



Figura 14. Montaje de medición de desplazamiento de biogás. Por: Quijano y Ramirez 2020.

Tabla 19. Cantidad de co-sustrato añadido al reactor1 y al reactor 2

Reactor	Volumen total del reactor	Volumen de inóculo	Cantidad de co-sustrato
1	4 L	2,5 L	-
2	4 L	2,5 L	20g

Nota: Cantidad de co-sustrato añadido a los reactores. Por: Quijano & Ramirez 2020.

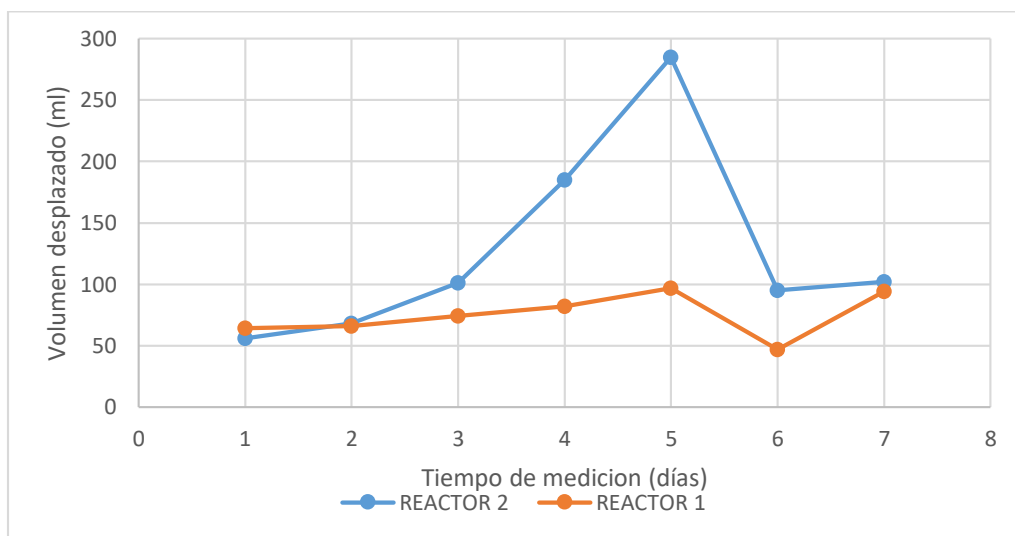
Los datos recopilados en la Tabla 20 muestran los valores más altos diarios desplazados en ml de cada uno de los reactores (Reactor 1 y Reactor 2) durante 7 días. La medición de biogás se produjo a las 10:00 am, 12:00 pm, 2:00 pm y 4:00 pm del día.

Tabla 20. Volumen desplazado por el biorreactor durante la corrida.

Días	Volumen desplazado en el Reactor 1* (ml)	Volumen desplazado en el Reactor 2* (ml)
1	64	56
2	66	68
3	74	101
4	82	185
5	97	285
6	47	95
7	94	102

Reactor 1: Inóculo; Reactor 2*: inóculo + plátano.*

Nota: Volumen desplazado por el biorreactor durante la corrida Por: Quijano & Ramirez 2020.



Gráfica 9. Curva de producción diaria de biogás en ml por el reactor 1 y 2. Por: Quijano & Ramirez 2020.

En la Gráfica 9 se puede observar la producción en ml de biogás durante los 7 días, el Reactor 1 (solo inóculo) tuvo una producción total de 524 ml de biogás, donde el 73,09% fueron producidos en los primeros 5 días luego del arranque del reactor, siendo este mismo día el pico más alto de generación del mismo. Al observar la curva de producción de biogás de Reactor 2 (inóculo +residuos de plátano), se observa claramente la mayor producción de biogás, para un total de 892

ml en el mismo periodo. Es muy apreciable el aporte de la materia orgánica del co-sustrato (plátano descartado y vástago) en la producción de biogás. Siendo el máximo pico de producción el día 5, ya que los carbohidratos del plátano al igual que en los microreactores batch necesitaron varios días adicionales a las excretas para mejorar su degradación, aunque en este caso la agitación acelera el proceso, al mejorar el contacto entre las bacterias anaerobias y los sustratos.

La agitación continua incrementa en gran medida la producción de biogás, por lo que los tiempos son menores, en este caso a los 7 días ya había disminuido en un 80% la producción de biogás con respecto al pico de producción máximo para la corrida con excretas porcinas, lo que indicó que la mayor parte del co-sustrato se había digerido, con el fin de observar la diferencia al agregar co-sustrato lo cual se evidenció claramente a los 7 días.

Este estudio evidencia que la agitación proporciona mayor homogeneidad y contacto entre las bacterias y el sustrato. Durante el tiempo que se llevó a cabo esta corrida se observaron de igual forma otro tipo de factores que fueron apareciendo a medida que iba transcurriendo el tiempo como la formación de espuma en la parte superior de reactor, lo que impedía que el gas saliera con facilidad, pero esto fue desapareciendo a medida que se aumentó la velocidad de agitación.

La producción de biogás instantánea promedio que tuvo durante los 7 días de medición fue de 2313,98 ml/d*g SV como se puede observar en la Tabla 21, este valor hace referencia al biopotencial que tiene estos residuos para ser utilizados como co-sustrato en la producción de biogás.

Tabla 21. Producción instantánea de biogás del co-sustrato.

DÍAS	ml/g SV*d
1	-50,30
2	12,58
3	169,58
4	647,66
5	1182,14
6	301,82
7	50,30

Nota: Producción instantánea de biogás del co-sustrato. Por: Quijano & Ramirez 2020..

9.4 Comparación teórica del biopotencial de biogás de otros co-sustratos con el realizado experimentalmente.

Tabla 22. Comparación teórica de la cantidad de biogás producido por diferentes co-sustratos.

Co-sustrato	Tiempo de retención (Días)	Cantidad añadida de co-sustrato (Kg)	Volumen de biogás producido (L)	Volumen producido por unidad de co-sustrato L/Kg
Vástago y plátano descartado	7	0,02*	4,512**	225,6
Cascara de naranja ¹	30	2	72	36
Banano de rechazo ²	15	15	33,6	2,24
Pulpa de café ³	30	1	93,83	93,83

¹(López et al., 2015), ²(Guevara et al., 2011), ³(Londoño, 2017)

*Este valor equivale a la cantidad de sustrato añadido 20g convertido en unidades de Kg para facilitar su comparación.

** Este valor corresponde a la cantidad de biogás producido 4512 ml convertido en unidades de L.

Nota: Comparación teórica de la cantidad de biogás producido por diferentes co-sustratos Por: Quijano & Ramirez 2020.

En la Tabla anterior se observa una comparación de la cantidad de biogás producido por diferentes residuos orgánicos usados como co-sustrato para el proceso de digestión anaerobio, en donde se tienen en cuenta únicamente variables como el tiempo de retención (TR), cantidad de sustrato añadido, y la cantidad de biogás producido, obviando factores que influyen de manera directa en la producción ya que es poco frecuente encontrar que este tipo de investigaciones se lleven a cabo bajo las mismas condiciones tales como temperatura, tipo de inóculo, reactor y frecuencia de alimentación.

El co-sustrato usado en el presente estudio arrojó una cantidad de biogás de 4,512 L con un TR de 7 días, este cálculo se realizó con base a las diferencias diarias entre ambos reactores para cada día (Tabla 20), lo que representa el volumen de biogás aportado por el co-sustrato agregado (20 g). Esta velocidad de producción se realizó en un periodo de 2 horas, donde se estableció una relación tomando en cuenta 12 mediciones para 24 h/día, lo que da como resultado el valor de volumen

total producido durante los 7 días. De esta manera los co-sustratos presentados en la Tabla 22, los residuos de plátano presentaron la mayor producción expresada en L/Kg de co-sustrato.

La producción de biogás que presenta el co-sustrato de cascara de naranja fue de 36 L/Kg, respecto al co-sustrato en estudio que arroja 225,6 L/Kg, se puede determinar que la factibilidad que tiene el vástago y plátano descartado es mayor debido a las características que lo componen, con una diferencia de 189,6 L/Kg de producción de biogás.

10. Discusión de resultados

En la presente investigación se utilizó como sustrato principal las excretas porcinas y como co-sustrato el vástago y plátano descartado. Los resultados obtenidos permiten decir que la co-digestión de ambos sustratos se realizó sin ningún problema que impidiera el buen desempeño de la producción de biogás, a pesar de la menor velocidad de degradación de los residuos de plátano, estos aportaron una gran cantidad de biogás. Esto se puede fundamentar en su alto contenido de ST con un 24,35% y SV 80,52%.

Durante el desarrollo de este estudio, se evidenció que el proceso de digestión anaerobia en condiciones locales da como resultado un alto biopotencial de biogás con un valor de 402,33 ml/g SV y 82% de metano del co-sustrato; este biopotencial de biogás es comparable al obtenido por otros sustratos de naturaleza similar como el maíz, cebada o restos de paja (ver Tabla 18).

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede determinar la influencia de los inóculos en el proceso de digestión anaerobia, ya que de estos depende la disponibilidad de bacterias anaerobias, siendo estas indispensables para poder llevar a cabo una buena degradación de la materia orgánica. En la Tabla 10 se observa las características físico-químicas de los inóculos empleados, siendo cada uno de ellos de diferente procedencia; el Inóculo 1 arrojó resultados que no eran apropiados para la producción de biogás, ya que este fue cultivado en un reactor rural que no contaba con condiciones apropiadas y un seguimiento continuo, a diferencia del Inóculo 2 y 3 que fueron cultivados en un reactor tipo batch semicontinuo con agitación a escala laboratorio, donde contaba con un monitoreo constante con el fin de proporcionar estabilidad en el proceso y una alimentación diaria para así asegurar la actividad microbiana.

La producción diaria instantánea de biogás, que fue obtenida mediante el método de desplazamiento de volumen, tuvo un desplazamiento constante durante el tiempo de retención (7 días), con un volumen total de 2,5 L de inóculo y 20 g de co-sustrato, para un promedio de producción diaria instantánea de 2313,98 ml/d*g SV, este valor equivale a la factibilidad que tienen los residuos de plátano para la generación de biogás.

Conclusiones

Según las características físico-químicas del co-sustrato se determinó que el vástago y el plátano descartado pueden ser utilizados para la digestión anaerobia y la producción de biogás, ya que los resultados obtenidos de los SV y ST, se encuentran dentro del rango establecido valores de 80,52% de SV y 24,35% de ST lo que hace que sean residuos con gran factibilidad de degradación de la materia orgánica.

El análisis expuesto nos indica una aceptación de la hipótesis que el vástago y plátano descartado puede ser usado como co-sustrato, ya que se obtuvo un biopotencial de biogás de 402,33 ml/grSV y 82% de metano, similar al de otros residuos de la misma naturaleza como maíz, cebada y paja.

Se pudo observar que la agitación es un factor importante para la generación de biogás ya que esto permite una mejor actividad microbiana, al igual que ayuda a la homogenización de los sustratos evitando la sedimentación de los mismos y aumentando a la cantidad de biogás, con una producción de 2313,98 ml/d*g SV.

Se concluyó que la factibilidad de producción de biogás del vástago y el plátano descartado es mayor en relación con otros co-sustratos como la cascara de naranja, banano de rechazo y la pulpa de café, teniendo en cuenta que se manejan las mismas unidades y se observa que tanto las cantidades de co-sustrato como el tiempo de retención son menores a comparación de los mencionados anteriormente, con 4,512 L de biogás producido durante 7 días de retención con 0,02 kg de sustrato.

Recomendaciones

El % de metano resultado del co-sustrato (vástago y plátano descartado), presenta un valor alto en comparación con otros sustratos de origen vegetal. Se sugiere mejorar la medición ya que experimentos en el Meta con co-sustratos similares de residuos agrícolas, han dado porcentajes igual de altos en reactores rurales. Por consiguiente, es necesario utilizar otro tipo de medición para corroborar éste dato (Zárate, 2019).

El Inóculo es un componente significativo en el proceso de digestión anaerobia, por lo tanto, se recomienda el cultivo del mismo bajo las mismas condiciones en las cuales se dará inicio a la producción, esto para garantizar la disponibilidad de nutrientes, de igual forma realizar monitoreos constantes para identificar la etapa y el estado de las bacterias.

Previo al montaje de los experimentos se aconseja realizar varias pruebas con diferentes recipientes, preferiblemente con sello hermético, para reducir las posibles fallas (fugas) que puedan presentarse durante el funcionamiento de estos, y así obtener resultados confiables para la comparación con otros estudios.

Se sugiere que las excretas porcinas que se van a utilizar como sustrato principal para la obtención de biogás, provengan de animales criados en condiciones naturales, alimentación a base de desechos orgánicos (lavaza) y que no se encuentren sometidos bajo ningún medicamento como antibiótico, ya que esto hace que las bacterias sufran alteraciones e inhiben el proceso de degradación de la materia orgánica.

Por último, se recomienda que el montaje de este tipo de experimentos se realice en un lugar donde su acceso no sea restringido y permitan el funcionamiento de los equipos de forma continua, para así evitar una intermitencia durante el proceso con el fin de asegurar mediciones constantes y precisión en los resultados.

Referencias bibliográficas

- Acosta, M., & Pasqualino, J. (2014). Potencial de uso de biogás en Colombia. *Teknos revista científica*, 14(2), 27. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6382641>
- Angarita, P. P., Ariza, H., Blanco, I. T., Noguera, C. E., & Redondo, I. E. (2010). *Aprovechamiento del raquis del banano y otros residuos biodegradables como fertilizantes orgánicos en el cultivo de esta fruta*. Tesis. Instituto Nacional de Formación Técnico Profesional. Recuperado de http://app.infotephvg.edu.co/cienaga/hermesoft/portal/home_1/rec/arc_524.pdf
- Alcaldía de Fuente de Oro-Meta. (2015). *Retos de la cadena productiva del plátano en el Meta*. Recuperado de https://www.academia.edu/29078223/Retos_de_la_cadena_productiva_del_pl%C3%A1tano_en_el_Meta
- Apolo, G. M. (2019). *Diseño y emplazamiento de un biodigestor para el aprovechamiento de biogás en la granja de explotación porcina «Mis Tres Marías» Arenillas-El Oro-Ecuador*. Tesis. Universidad Politecnica Salesiana Sede Cuenca. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16989/1/UPS-CT008164.pdf>
- Cadavid, O., & Giraldo, E. (2011). EJE21. Residuos del plátano: ganancia extra para cultivadores. Recuperado de <https://www.eje21.com.co/2011/02/residuos-del-pltano-ganancia-extra-para-cultivadores/>
- Casas, L., & Sandoval, G. (2014). Enzimas en la valorización de residuos agroindustriales. *Revista Digital Universitaria* 15, 12, 95. Recuperado de <http://www.revista.unam.mx/vol.15/num12/art95/>
- Castellanos, F. J., & Lucas, L.C. (2011). Caracterización física del fruto en variedades de plátano cultivadas en la zona cafetera de Colombia. *Revista bdigital*, 60. Recuperado de https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/27847/28115
- Cendales, E. D. (2011). *Produccion de biogas mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable*. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/4100/1/edwindariocendalesladino.2011.parte1.pdf>
- Córdoba, V., Fernadez, M., & Santalla, E. (2014). *Influencia del inóculo en la digestion anaerobia*

- de purín de cerdo*. Tesis. Universidad Nacional de la Provincia de Buenos Aires. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/268386719_Influencia_del_inoculo_en_la_digestion_anaerobica_de_purin_de_cerdo
- Cubillos, D., & Huertas, D. (2018). *Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de un biodigestor tubular anaerobio a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales porcinas en la Institución Educativa Agrícola Guacavia, Cumaral-Meta*. Tesis. Universidad Santo Tomas Sede Villavicencio. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/15536>
- Decreto 596. (2016). Por el cual se modifica y adiciona el decreto en lo relativo con el esquema de la actividad de aprovechamiento del servicio público de aseo y el régimen transitorio para la formalización de los recicladores de oficio, y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 49.841. <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/30021592>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2014). Boletín mensual. Insumos y factores asociados a la producción agropecuaria. (22) Recuperado de <http://www.rinconesdelatlantico.com>
- European Biogas Association. (2013). Biogas and biomethane (Biogás y Biometano). Brussels, Belgium. Recuperado de <http://european-biogas.eu/publications-homepage/biogas-and-biomethane/>
- Flores, J., & Acevedo, L. (2016). *Estudio de factibilidad de producción de biogás en Pueblo Rico Risaralda*. Tesis. Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/7242/6581186132.pdf?sequence=1>
- Garcés, L. A., Gutierrez, P. A., & Reyes, J. P. (2014). *Producción de Biogás a partir de residuos agrícolas*. Tesis. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Recuperado de https://www.academia.edu/10345310/PROYECTO_DE_INVESTIGACION_Produccion_de_Biogas_a_partir_de_residuos_agricolas
- Garcia, C.C, Mirquez, L. D, & Hernandez, M. (2018). Biodegradation of rice straw under anaerobic digestion (Biodegradación de la paja de arroz bajo digestión anaerobia). *Environmental Technology and Innovation*, 10, 215-222. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.02.009>

- García, L. S., Jaramillo, L. M., Mondragón, J. M. & Serna, J. A. (2018). Caracterización fisicoquímica de los subproductos cáscara y vástago del plátano Dominico harton. *Revista Ion*, (30), 21-24. <https://doi.org/10.18273/revion.v31n1-2018003>
- Gobierno de Chile/ Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo/ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura/ Global Environment Facility. (2011). *Manual del biogás*. (64). Recueprado de <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- González, E. T., & Jurado, P. C. (2017). Sustratos y producción de biogás en biodigestores. Una revisión sistemática. *Ingenciencia*, (2). Recuperado de http://editorial.ucentral.edu.co/ojs_uc/index.php/Ingenciencia/article/view/2352/2176
- Guaminga, O. I. (2013). *Obtención de biogás a partir de residuos sólidos de la agroindustria*. Tesis. Universidad Politécnica Salesiana sede Quito. Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>
- Guerrero, O. O. (2017). *Evaluación del potencial de producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de la caña de azúcar*. Tesis. Universidad ICESI. Recuperado de https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/82464/1/TG01758.pdf
- Guevara, C. A., Arenas, H. A., Mejía, A., & Peláez, C. A. (2011). Obtención de Etanol y Biogás a Partir de Banano de Rechazo. *Información Tecnológica*, (23), 19-31. Recuperado de <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000200004>
- Instituto Para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Biomasa-Digestores anaerobios* (94). Recuperado de <https://www.idae.es/publicaciones/energia-de-la-biomasa>
- Jaramillo, G., & Zapata, L. M. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. Tesis. Universidad de Antioquia. Recuperado de <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/45/1/AprovechamientoRSOUenColombia.pdf>
- Jaramillo, M. J., & Tamayo, D. F. (2019). Evaluación de la producción de biogás a partir de lodos residuales recolectados de una ptar, en un reactor de la pontificia universidad javeriana. Tesis. Fundación Universidad de América. Recuperado de <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7389/1/6141293-2019-1-IQ.pdf>
- Ley 1665. (2013). Por medio de la cual se aprueba el "Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). Congreso de la República. http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/2013/LEY_1665_DEL_16_DE

JULIO DE 2013.pdf

- Ley 1715. (2014). Por el cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Diario Oficial 49.150. Congreso de la república. <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1687143>
- Ley 629. (2000). Por medio de la cual se aprueba el "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático". Diario Oficial 44.272. Congreso de la República. <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1665007>
- Londoño, H. D. (2017). *Aprovechamiento de pulpa de café para la producción de biogás en un reactor flujo pistón*. Tesis. Universida Pontificia Bolivariana. Recuperado de <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/3297/APROVECHAMIENTO%20DE%20PULPA%20DE%20CAF%C3%89%20PARA%20LA%20PRODUCCI%C3%93N.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- López, R., Quinto, P., Aguilar, H., & Garibay, C. (2015). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos putrescibles en la ciudad de México. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, 3, 1-9. Recuperado de <http://192.188.48.56/ojs/index.php/quimica/article/view/347>
- Mazzeo, M., León, L., Mejía, L. F., Guerreo, L. E., & Botero, J. D. (2010). Aprovechamiento Industrial De Residuos de Cosecha y Postcosecha del Plátano en el Departamento de Caldas. *Revista Educación en Ingeniería*, 9, 128-139. Recuperado de <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.26507/rei.v5n9.14>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2017). Cifras Agropecuarias 2017. Recuperado de <http://www.agronet.gov.co/Paginas/estadisticas.aspx>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2018). Cadena De Plátano Febrero 2018. Colombia. Recuperado de <https://sioc.minagricultura.gov.co/Platano/Documentos/002 - Cifras Sectoriales/Cifras Sectoriales - 2018 Febrero Platano.pdf>
- Montaño, O., Corona, J., & Montelongo, M. (2009). Metodología sistémica para el desarrollo de un proyecto de Biogás. *XIII Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Administrativas, la administración frente a la globalización: Gobernabilidad y Desarrollo*. Recuperado de https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/5173/prod_12.pdf
- Montenegro, K.T., Rojas, A.S., Cabeza, I., & Hernandez, M. A. (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), 23-37. Recuperado de <https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016002>
- Navarro, R. (2016). *Obtención de biogás a partir de residuos agrícolas y de producción de biodiésel*. Tesis. Universidad de La Laguna. Recuperado de <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/2927/OBTENCION%20DE%20BIOGAS%20A%20PARTIR%20DE%20RESIDUOS%20AGRICOLAS%20Y%20DE%20PRODUCCION%20DE%20BIODIESEL.pdf?sequence=1>
- Núñez, D. W. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Tecnura, Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, 16(34), 142-156. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4114491>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2014). Residuos agrícolas y residuos ganaderos. *Bioenergía y Seguridad Alimentaria Evaluación Rápida (BEFS)* (p. 9). Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-bp843s.pdf>.
- Peñaranda, L. V., Montenegro, S. P., & Giraldo, P. A. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* (Vol. 8, pp. 141-150). Recuperado de <https://doi.org/10.22490/21456453.2040>
- Pérez, S., Wong, A., Bello, R., & Yañez, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229-235. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>
- Red de Biodigestores Para Latino América y el Caribe. (2019). *RedBioLac*, 3, 52. Recuperado de <http://redbiolac.org/>
- Rojas, C. J., Contreras, H., & Rojas, M. P. (2018). *Determinación del potencial de biogás de diferentes sustratos para la codigestión anaerobia con excretas animales*. Proyecto de investigación. Universidad Santo Toma de Villavicencio. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/22656>
- Secretaría de Medio Ambiente/ Alcaldía de Fuente de Oro-Meta. (2019). Asociaciones de Agricultores de Fuente de Oro.
- Serrato, C., & Lesmes, V. (2016). *Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el departamento de cundinamarca*. Tesis. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Recuperado de [http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3687/1/Documento final Metodología](http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3687/1/Documento%20final%20Metodología)

Potencial Energético Biomasa.pdf

Silva, J. P. (2002). Tecnología del Biogás. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 19.

Recuperado de <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Zárate, J. (2019). *Evaluación de los productos de tres biodigestores tubulares y su impacto en la economía campesina en el municipio de Lejanías-Meta. Tesis de Maestría*. Univeridad de los llanos.

Recuperado de

http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=000089317

Anexos

Anexo A. Tablas de valores de sólidos totales y sólidos volátiles del co-sustrato y sustratos principales.**Tabla 1. Determinación de sólidos totales de las excretas de La Universidad de los Llanos.**

Excretas (unillanos)	peso inicial de porcelana (g)	pcapsula+mu estra (g)	pmuestra	pcapsula+mu estra después de 105° c por 24h	pmuestra secada	st	% st
	86,80	136,78	49,97	111,26	24,45	0,489	48,93
	84,02	134,01	49,99	109,37	25,35	0,507	50,71
	88,37	138,34	49,96	113,39	25,01	0,500	50,05
	93,09	143,28	50,19	117,91	24,82	0,494	49,45
promedios	88,07	138,10	50,03	112,98	24,912	0,497	49,79

Tabla 2. Determinación de sólidos totales del plátano

plátano	peso inicial de porcelana	pcapsula+m uestra (g)	pmuestra	pcapsula+m uestra después de 105° c por 24h	pmuestra secada	st	% st
	67,77	117,60	49,82	79,43	11,65	0,234	23,40
	106,04	156,04	50,00	117,16	11,11	0,222	22,23
	89,68	139,84	50,16	103,24	13,55	0,270	27,02
	75,09	125,17	50,07	87,48	12,38	0,247	24,73
promedios	84,65	134,66	50,01	96,83	12,18	0,243	24,35

Tabla 3. Determinación de los sólidos volátiles de las excretas de La Universidad de Los Llanos.

excretas (unillanos)	pcrisol (g)	pcrisol+mues tra (g)	pmuestra	pcrisol+mues tra después de 550° c por 2h	pmuestra calcinada	si	%si	%sv
	15,64	17,84	2,20	16,99	1,35	0,613	61,3605	38,639
	18,68	21,94	3,26	19,94	1,25	0,386	38,607	61,392
	17,87	21,01	3,13	20,34	2,47	0,787	78,776	21,223
	18,75	21,17	2,41	20,35	1,59	0,658	65,839	34,160
promedios	17,73	20,49	2,75	19,40	1,66	0,604	60,569	39,430

Tabla 4. Determinación de los sólidos volátiles del plátano.

plátano	p _{crisol} (g)	p _{crisol+muestra} (g)	p _{muestra}	p _{crisol+muestra} a después de 550°C por 2h	p _{muestra} calcinada	si	%si	%sv
	17,30	20,73	3,42	17,50	0,19	0,05	5,63	94,36
	16,98	19,85	2,86	18,02	1,03	0,35	35,97	64,02
promedios	17,14	20,29	3,145	17,76	0,61	0,19	19,47	80,52

Tabla 5. Determinación de los sólidos totales del Inoculo 2.

INÓCULO	Peso inicial de porcelana (g)	P _{capsula+muestra} (g)	P _{muestra} (ml)	P _{capsula+muestra} a después de 105°C por 24h	P _{muestra} secada	ST	%ST
	93,01	142,57	49,56	95,56	2,55	0,05	5,14
	90,73	138,30	47,57	93,20	2,47	0,05	5,20
	88,31	138,19	49,87	90,90	2,58	0,05	5,18
	86,79	137,47	50,67	89,12	2,32	0,04	4,59
PROMEDIOS	89,71	139,13	49,42	92,19	2,48	0,05	5,02

Tabla 6. Determinación de los sólidos volátiles del inoculo 2.

INÓCULO	P _{crisol} (g)	P _{crisol+muestra} (g)	P _{muestra}	P _{crisol+muestra} después de 550°C por 2h	P _{muestra} calcinada	SI	%SI	%SV
	20,16	22,47	2,31	21,35	1,18	0,51	51,38	48,61
	21,84	24,03	2,19	22,97	1,12	0,51	51,45	48,54
	18,27	20,61	2,33	19,49	1,22	0,52	52,22	47,77
	21,21	23,30	2,09	22,38	1,17	0,56	56,0	43,99
PROMEDIOS	20,37	22,60	2,23	21,55	1,17	0,52	52,70	47,29

Tabla 7. Determinación de los sólidos totales de las excretas de la Colonia Agrícola de Acacias-Meta.

Excretas (carcel)	Peso inicial de porcelana (g)	Pcapsula+muestra (g)	Pmuestra (ml)	Pcapsula+muestra a despues de 105°C por 24h	Pmuestra secada	ST	%ST
	95,58	145,59	50,01	106,28	10,69	0,213	21,38
	88,44	135,2	46,75	102,25	13,80	0,295	29,52
	86,91	137,75	50,83	98	11,08	0,218	21,80
	90,82	143,28	52,46	98,59	7,76	0,148	14,80
Promedios	90,44	140,45	50,01	101,28	10,83	0,218	21,88

Tabla 8. Determinación de los sólidos volátiles de las excretas de la Colonia Agrícola de Acacias-Meta.

Excretas (carcel)	Pcrisol (g)	Pcrisol+muestra (g)	Pmuestra	Pcrisol+muestra a despues de 550°C por 2h	Pmuestra calcinada	SI	%SI	%SV
	20,18	23,14	2,96	20,92	0,73	0,248	24,87	75,12
	21,84	24,98	3,14	22,64	0,80	0,254	25,47	74,52
	18,27	21,26	2,98	19,01	0,73	0,246	24,61	75,38
	21,21	23,32	2,11	21,73	0,52	0,245	24,59	75,40
Promedios	20,37	23,18	2,80	21,07	0,69	0,248	24,89	75,10

Tabla 9. Determinación de los sólidos totales del inóculo de excretas de la Colonia Agrícola de Acacias-Meta.

Inóculo excretas (carcel)	Peso inicial de porcelana (g)	Pcapsula+muestra (g)	Pmuestra (ml)	Pcapsula+muestra a despues de 105°C por 24h	Pmuestra secada	ST	%ST
	67,94	116,37	48,42	69	1,058	0,02	2,18
	92,06	136,72	44,66	93,15	1,092	0,02	2,44
	76,5	117,85	41,35	77,50	1,008	0,02	2,43
	84,14	107,79	23,64	84,78	0,642	0,02	2,71
Promedios	80,16	119,68	39,52	81,11	0,95	0,02	2,44

Tabla 10. Determinación de los sólidos volátiles del inóculo de excretas de la Colonia Agrícola de Acacias-Meta.

Inóculo excretas (carcel)	Pcrisol (g)	Pcrisol+muestra (g)	Pmuestra	Pcrisol+muestra despues de 550°C por 2h	Pmuestra calcinada	SI	%SI	%SV
	20,17	21,98	1,81	20,36	0,188	0,103	10,35	89,64
	21,84	22,72	0,87	22,05	0,211	0,240	24,03	75,96
	18,27	19,09	0,81	18,45	0,183	0,224	22,42	77,57
	21,20	21,72	0,52	21,31	0,109	0,209	20,96	79,03
Promedios	20,37	21,38	1,00	20,54	0,172	0,194	19,44	80,55

Anexo B. Datos reales diarios y acumulado de las 3 corridas realizadas.

Tabla 11. Datos reales diarios de la corrida 1.

DATOS REALES-DIARIOS				
DÍAS	INÓCULO-EXCRETAS		PLÁTANO-EXCRETAS-INÓCULO	
	R3 (METANO)	R4 (BIOGÁS)	R5 (METANO)	R6 (BIOGÁS)
1	0	0	9,3	10,4
2	0	0	14,8	16,5
3	2,2	0	8,5	11
4	7,4	5,3	10,2	12
5	7,4	5,3	10,2	12
6	5,3	7,2	9,1	11,5
7	5,3	7,2	9,1	11,5
8	12	10,4	11	12,5
9	5,4	3,6	4,3	6,5
10	5,4	3,6	4,3	6,5
11	6,7	11,2	8,2	11
12	8,4	9,4	5,8	4
13	10,9	7,1	13,2	14,5
14	10,9	7,1	13,2	14,5
15	12,7	9,2	14,7	16,1
16	9,4	10,4	15,3	17,2
17	12,4	13,2	21,1	25,7
18	10,8	7,5	25,4	32

19	18,3	0	28,7	30
20	15,4	0	21,9	35

Tabla 12. Datos reales acumulados de la corrida 1.

DATOS REALES-ACUMULADOS				
DÍAS	INÓCULO-EXCRETAS		PLÁTANO-EXCRETAS-INÓCULO	
	R3 (METANO)	R4 (BIOGÁS)	R5 (METANO)	R6 (BIOGÁS)
1	0	0	9,3	10,4
2	0	0	24,1	26,9
3	2,2	0	32,6	37,9
4	9,6	5,3	42,8	49,9
5	17	10,6	53	61,9
6	22,3	17,8	62,1	73,4
7	27,6	25	71,2	84,9
8	39,6	35,4	82,2	97,4
9	45	39	86,5	103,9
10	50,4	42,6	90,8	110,4
11	57,1	53,8	99	121,4
12	65,5	63,2	104,8	125,4
13	76,4	70,3	118	139,9
14	87,3	77,4	131,2	154,4
15	100	86,6	145,9	170,5
16	109,4	97	161,2	187,7
17	121,8	110,2	182,3	213,4
18	132,6	117,7	207,7	245,4
19	150,9	117,7	236,4	275,4
20	166,3	117,7	258,3	310,4

Tabla 13. Datos reales diarios de la corrida 2.

DATOS REALES-DIARIOS				
DÍAS	INÓCULO-EXCRETAS		PLÁTANO-EXCRETAS-INÓCULO	
	R3 (METANO)	R4 (BIOGÁS)	R5 (METANO)	R6 (BIOGÁS)

1	0	4,2	10,3	15
2	4,9	4,6	2,3	2,16
3	4,9	4,6	2,3	2,16
4	4,9	4,6	2,3	2,16
5	9,2	10,2	4,2	3,5
6	9,2	10,2	4,2	3,5
7	9,2	10,2	4,2	3,5
8	9,2	10,2	4,2	3,5
9	9,2	10,2	4,2	3,5
10	6,2	10	2,3	2,2
11	10,2	9,7	4,3	9,9
12	5,6	9,2	5,6	10,3
13	5,5	5,2	5,6	10,4
14	4,7	4,9	6,2	10,3
15	10,5	10,4	15,3	18,5
16	2,3	0	19,9	21
17	0	0	26,6	19
18	0	0	14,9	24,5
19	0	0	22,2	20
20	0	0	15,3	20

Tabla 14. Datos reales acumulados de la corrida 2.

DATOS REALES-ACUMULADOS				
DÍAS	INÓCULO-EXCRETAS		PLÁTANO-EXCRETAS-INÓCULO	
	R3 (METANO)	R4 (BIOGÁS)	R5 (METANO)	R6 (BIOGÁS)
1	0	4,2	10,3	15
2	4,9	8,8	12,6	17,166
3	9,8	13,4	14,9	19,33
4	14,7	18	17,2	21,5
5	23,9	28,2	21,4	25
6	33,1	38,4	25,6	28,5
7	42,3	48,6	29,8	32
8	51,5	58,8	34	35,5
9	60,7	69	38,2	39
10	66,9	79	40,5	41,2
11	77,1	88,7	44,8	51,1
12	82,7	97,9	50,4	61,4
13	88,2	103,1	56	71,8
14	92,9	108	62,2	82,1
15	103,4	118,4	77,5	100,6

16	105,7	118,4	97,4	121,6
17	105,7	118,4	124	140,6
18	105,7	118,4	138,9	165,1
19	105,7	118,4	161,1	185,1
20	105,7	118,4	176,4	205,1

Tabla 15. Datos reales diarios de la corrida 3.

DATOS REALES-DIARIOS				
DÍAS	INÓCULO-EXCRETAS		PLÁTANO-EXCRETAS-INÓCULO	
	R3 (METANO)	R4 (BIOGÁS)	R5 (METANO)	R6 (BIOGÁS)
1	10,5	9,2	17,8	19
2	9,2	11,4	10,2	22,5
3	9,2	11,4	10,2	22,5
4	16,5	14,7	23	30
5	27	25,6	31,3	35
6	25,8	22,7	29,6	31
7	10,2	15,3	11,4	17,5
8	10,2	15,3	11,4	17,5
9	15,6	17	18,2	19,5
10	13,8	24,1	17	21
11	21,9	26,8	22,7	27,5
12	21,9	26,8	22,7	27,5
13	16,6	17,4	18,5	22
14	16,6	17,4	18,5	22
15	16,6	17,4	18,5	22
16	24,2	27,6	28	32
17	9,4	18,3	11,5	14
18	15,7	25,6	27,2	38
19	12,4	23,3	16,5	24
20	11,5	18,5	13,8	19,33

Tabla 16. Datos reales acumulados de la corrida 3.

DATOS REALES-ACUMULADOS				
DÍAS	INÓCULO-EXCRETAS		PLÁTANO-EXCRETAS-INÓCULO	
	R3 (METANO)	R4 (BIOGAS)	R5 (METANO)	R6 (BIOGAS)

1	10,5	9,2	17,8	19
2	19,7	20,6	28	41,5
3	28,9	32	38,2	64
4	45,4	46,7	61,2	94
5	72,4	72,3	92,5	129
6	98,2	95	122,1	160
7	108,4	110,3	133,5	177,5
8	118,6	125,6	144,9	195
9	134,2	142,6	163,1	214,5
10	148	166,7	180,1	235,5
11	169,9	193,5	202,8	263
12	191,8	220,3	225,5	290,5
13	208,4	237,7	244	312,5
14	225	255,1	262,5	334,5
15	241,6	272,5	281	356,5
16	265,8	300,1	309	388,5
17	275,2	318,4	320,5	402,5
18	290,9	344	347,7	440,5
19	303,3	367,3	364,2	464,5
20	314,8	385,8	378	483,8

Anexo C. Ecuaciones para la determinación del biopotencial de biogas y el % de metano.

Ecuación de proporción de metano que produce el plátano (%)

Corrida 1. Ver datos en la tabla 18

$$\frac{220,39}{264,84} = 0,8321 * 100 = 83,21\%$$

Corrida 2. Ver datos en la tabla 20

$$\frac{150,52}{175,01} = 0,86 * 100 = 86\%$$

Corrida 3. Ver datos en la tabla 22

$$\frac{322,86}{413,26} = 0,7812 * 100 = 78,12\%$$

Ecuación de biopotencial de biogás del plátano (ml/grsv)

Corrida 1. Ver datos en la tabla 18

$$\frac{264,84 - 100,42}{0,1963} = 838,88$$

Corrida 2. Ver datos en la tabla 20

$$\frac{175,01 - 101,02}{0,1963} = 377,45$$

Corrida 3. Ver datos en la tabla 22

$$\frac{413,26 - 329,57}{0,1963} = 427,21$$

Anexo D. Datos normalizados diarios y acumulados de las corridas realizadas.

Tabla 17. Datos diarios normalizados de la corrida 1.

DATOS NORMALIZADOS-DIARIOS				
DÍAS	INÓCULO-EXCRETAS		PLÁTANO-EXCRETAS-INÓCULO	
	R3 (METANO)	R4 (BIOGÁS)	R5 (METANO)	R6 (BIOGÁS)
1	0	0	7,88	8,81
2	0	0	12,67	14,13
3	1,89	0	7,33	9,49
4	6,30	4,51	8,68	10,21
5	6,35	4,54	8,75	10,29
6	4,52	6,14	7,76	9,81
7	4,52	6,15	7,77	9,82
8	10,31	8,94	9,45	10,74
9	4,62	3,08	3,68	5,57
10	4,60	3,07	3,66	5,54
11	5,75	9,62	7,04	9,45
12	7,18	8,03	4,95	3,42
13	9,17	5,97	11,11	12,21
14	9,31	6,06	11,27	12,38
15	10,82	7,84	12,52	13,72
16	8,04	8,89	13,08	14,71
17	10,60	11,28	18,03	21,97
18	9,25	6,42	21,76	27,42
19	15,69	0	24,62	25,73
20	13,13	0	18,68	29,86

Tabla 18. Datos normalizados acumulados de la corrida 1.

DATOS NORMALIZADOS-ACUMULADOS		
DÍAS	INÓCULO-EXCRETAS	PLÁTANO-EXCRETAS-INÓCULO

	R3 (METANO)	R4 (BIOGÁS)	R5 (METANO)	R6 (BIOGÁS)
1	0	0	7,88	8,81
2	0	0	20,64	23,03
3	1,89	0	28,14	32,72
4	8,17	4,51	36,44	42,49
5	14,59	9,09	45,48	53,125
6	19,02	15,18	52,98	62,62
7	23,57	21,35	60,82	72,53
8	34,04	30,43	70,67	83,74
9	38,57	33,43	74,15	89,06
10	43,00	36,34	77,47	94,19
11	49,05	46,22	85,05	104,30
12	56,01	54,04	89,61	107,23
13	64,33	59,20	99,36	117,812
14	74,59	66,13	112,10	131,93
15	85,23	73,81	124,35	145,32
16	93,59	82,98	137,90	160,57
17	104,13	94,21	155,85	182,44
18	113,64	100,87	178,01	210,32
19	129,45	100,96	202,79	236,25
20	141,89	100,42	220,39	264,84

Tabla 19. Datos diarios normalizados de la corrida 2.

DATOS NORMALIZADOS-DIARIOS				
DÍAS	INÓCULO-EXCRETAS		PLÁTANO- EXCRETAS-INÓCULO	
	R3 (METANO)	R4 (BIOGÁS)	R5 (METANO)	R6 (BIOGÁS)
1	0	3,58	8,79	12,80
2	4,24	3,98	1,99	1,87
3	4,19	3,93	1,96	1,85
4	4,18	3,93	1,96	1,85
5	7,83	8,68	3,57	2,97
6	7,87	8,73	3,59	2,99
7	7,94	8,80	3,62	3,02
8	7,90	8,76	3,61	3,00
9	7,90	8,76	3,60	3,00
10	5,32	8,58	1,97	1,88
11	8,79	8,36	3,70	8,53
12	4,78	7,85	4,78	8,79
13	4,68	4,42	4,76	8,85

14	4,04	4,21	5,33	8,86
15	9,04	8,95	13,18	15,93
16	1,96	0	16,99	17,93
17	0	0	22,84	16,31
18	0	0	12,74	20,96
19	0	0	19,07	17,18
20	0	0	13,05	17,06

Tabla 20. Datos normalizados acumulados de la corrida 2.

DATOS NORMALIZADOS-ACUMULADOS				
DÍAS	INÓCULO-EXCRETAS		PLÁTANO-EXCRETAS-INÓCULO	
	R3 (METANO)	R4 (BIOGÁS)	R5 (METANO)	R6 (BIOGÁS)
1	0	3,58	8,79	12,80
2	4,24	7,62	10,92	14,88
3	8,39	11,47	12,75	16,55
4	12,56	15,38	14,70	18,37
5	20,34	24,00	18,21	21,27
6	28,33	32,86	21,91	24,39
7	36,53	41,97	25,73	27,63
8	44,27	50,54	29,22	30,51
9	52,13	59,25	32,80	33,49
10	57,40	67,79	34,75	35,35
11	66,50	76,50	38,64	44,07
12	70,60	83,58	43,03	52,42
13	75,10	87,79	47,68	61,14
14	79,92	92,91	53,51	70,63
15	89,07	102,00	66,76	86,66
16	90,26	101,10	83,13	103,84
17	90,75	101,66	106,47	120,72
18	90,44	101,31	118,85	141,26
19	90,81	101,72	138,41	159,03
20	90,19	101,02	150,52	175,01

DATOS NORMALIZADOS-ACUMULADOS				
DÍAS	INÓCULO-EXCRETAS		PLÁTANO-EXCRETAS-INÓCULO	
	R3 (METANO)	R4 (BIOGÁS)	R5 (METANO)	R6 (BIOGÁS)

1	0	0	7,88	8,81
2	0	0	20,64	23,03
3	1,89	0	28,14	32,72
4	8,17	4,51	36,44	42,49
5	14,59	9,09	45,48	53,125
6	19,02	15,18	52,98	62,62
7	23,57	21,35	60,82	72,53
8	34,04	30,43	70,67	83,74
9	38,57	33,43	74,15	89,06
10	43,00	36,34	77,47	94,19
11	49,05	46,22	85,05	104,30
12	56,01	54,04	89,61	107,23
13	64,33	59,20	99,36	117,812
14	74,59	66,13	112,10	131,93
15	85,23	73,81	124,35	145,32
16	93,59	82,98	137,90	160,57
17	104,13	94,21	155,85	182,44
18	113,64	100,87	178,01	210,32
19	129,45	100,96	202,79	236,25
20	141,89	100,42	220,39	264,84

Tabla 21. Datos reales normalizados de la corrida 3.

DATOS NORMALIZADOS-DIARIOS				
DÍAS	INÓCULO-EXCRETAS		PLÁTANO-EXCRETAS-INÓCULO	
	R3 (METANO)	R4 (BIOGAS)	R5 (METANO)	R6 (BIOGAS)
1	8,84	7,74	14,98	15,99
2	7,76	9,62	8,60	18,98
3	7,73	9,57	8,57	18,90
4	13,92	12,40	19,41	25,31
5	22,88	21,69	26,53	29,66
6	21,94	19,30	25,17	26,36
7	8,62	12,94	9,64	14,80
8	8,60	12,91	9,62	14,76
9	13,39	14,60	15,63	16,74
10	11,72	20,47	14,44	17,84
11	18,54	22,69	19,22	23,28
12	18,34	22,44	19,01	23,03
13	14,36	15,062	16,01	19,04

14	14,19	14,88	15,82	18,81
15	14,04	14,71	15,64	18,60
16	20,58	23,47	23,81	27,21
17	7,941	15,46	9,715	11,82
18	13,26	21,62	22,97	32,10
19	10,52	19,77	14,00	20,36
20	9,82	15,80	11,78	16,51

Tabla 22. Datos normalizados acumulados de la corrida 3.

DATOS NORMALIZADOS-ACUMULADOS				
DÍAS	INÓCULO-EXCRETAS		PLÁTANO-EXCRETAS-INÓCULO	
	R3 (METANO)	R4 (BIOGAS)	R5 (METANO)	R6 (BIOGAS)
1	8,84	7,74	14,98	15,99
2	16,62	17,38	23,63	35,02
3	24,28	26,88	32,09	53,77
4	38,31	39,41	51,64	79,33
5	61,36	61,28	78,40	109,34
6	83,51	80,79	103,83	136,06
7	91,68	93,29	112,91	150,13
8	100,09	105,99	122,28	164,56
9	115,27	122,48	140,09	184,24
10	125,73	141,6169	153,00	200,06
11	143,85	163,84	171,71	222,68
12	160,64	184,51	188,86	243,30
13	180,39	205,76	211,21	270,51
14	192,41	218,15	224,48	286,06
15	204,35	230,49	237,68	301,54
16	226,04	255,21	262,78	330,38
17	232,49	268,99	270,76	340,04
18	245,76	290,62	293,74	372,14
19	257,35	311,65	309,02	394,13
20	268,88	329,52	322,86	413,26

Anexo E. Relación para la determinación del volumen producido en litros durante 24/h por 7 días.

Día	Volumen R1 (ml)	Volumen R2 (ml)	Diferencia ambos reactores (ml)	*Producción de 24/h (ml)
1	64	56	0	0
2	66	68	2	24

3	74	101	27	324
4	82	185	103	1236
5	97	285	188	2256
6	47	95	48	576
7	94	102	8	96
Total	524	892	368	4512

*Para hallar la producción de 24/h se multiplicó por 12 siendo el total de mediciones tenidas en cuenta en un día.

Volumen total de biogás producido durante 7 días es de **4,512 L**