

**APROVECHAMIENTO DE PULPA DE CAFÉ PARA LA PRODUCCIÓN
DE BIOGÁS EN UN REACTOR FLUJO PISTÓN**

HERNÁN DARÍO LONDOÑO ESPINOSA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
MEDELLÍN

2017

**APROVECHAMIENTO DE PULPA DE CAFÉ PARA LA PRODUCCIÓN
DE BIOGÁS EN UN REACTOR FLUJO PISTÓN**

HERNÁN DARÍO LONDOÑO ESPINOSA

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en
Ciencias Naturales y Matemáticas -Profundización en Química-

Asesor

OSCAR HERNÁN VASCO ECHEVERRI

Ingeniero Químico, Doctor en Biotecnología

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS

MEDELLÍN

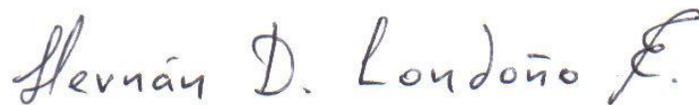
2017

Mayo de 2017

HERNÁN DARÍO LONDOÑO ESPINOSA

“Declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad”. Art. 82 Régimen Discente de Formación Avanzada.

Firma



Hernán D. Londoño E.

cc. 8.458.975

A mi madre, a mi esposa Cristina y a mis hijos:
Samuel, Luis Daniel y Ana Lucía

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos:

Al Ingeniero Químico y Ph.D. Oscar Hernán Vasco Echeverri, director de tesis, por los valiosos conocimientos que siempre me aportó y que hicieron posible alcanzar la meta propuesta.

A la Facultad de Ingeniería y al Sistema de Formación Avanzada de la Universidad Pontificia Bolivariana por sus sabias enseñanzas y formadoras exigencias.

A la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín por mostrarme su grandeza.

A la Gobernación de Antioquia por su invaluable apoyo.

A toda mi familia, compañeros de estudio, amigos, docentes y a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este proyecto.

CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
2. JUSTIFICACIÓN.....	5
3. OBJETIVOS.....	6
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	6
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
4. MARCO REFERENCIAL	7
4.1 EL CULTIVO DEL CAFÉ	7
4.1.1 El café en el mundo	7
4.1.2 El café en Colombia.....	7
4.1.3 El café en el municipio de Fredonia –Antioquia.....	8
4.2 RESIDUOS GENERADOS EN LA INDUSTRIA DEL CAFÉ	9
4.3 DIGESTIÓN ANAEROBIA	11
4.4 SISTEMAS UTILIZADOS EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	14
4.4.1 Reactor de mezcla completa sin recirculación	14
4.4.2 Reactor de mezcla completa con recirculación	15
4.4.3 Reactor anaerobio de flujo ascendente con lecho de lodo UASB.....	16
4.4.4 Otros reactores anaerobios.....	17
4.4.5 Reactor de cúpula fija	17
4.4.6 Reactor de cúpula móvil.....	19
4.4.7 Reactor discontinuo o por lotes.....	19
4.4.8 Reactor Flujo Pistón -PFR	20
5. DISEÑO METODOLÓGICO.....	22
5.1 OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	22
5.2 ENSAYOS PRELIMINARES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA A NIVEL DE LABORATORIO.....	24
5.3 CONSTRUCCIÓN DE UN DIGESTOR ANAEROBIO TIPO FLUJO PISTÓN.....	29
5.4 PUESTA A PUNTO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EMPLEANDO PULPA DE CAFÉ EN UN REACTOR FLUJO PISTÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	31
5.5 ELABORACIÓN DE UN DOCUMENTO GUÍA PARA CAFICULTORES Y ESTUDIANTES.....	32

6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	33
6.1	ENSAYOS PRELIMINARES DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO	33
6.2	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN UN REACTOR FLUJO PISTÓN PFR DE 400 L.....	41
7.	CONCLUSIONES	46
8.	RECOMENDACIONES.....	47
	BIBLIOGRAFÍA	48

ANEXO 1

	CÓMO PRODUCIR GAS A PARTIR DE PULPA DE CAFÉ - GUÍA PARA CAFICULTORES Y ESTUDIANTES -.....	51
--	--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas del proceso de digestión anaerobia	13
Figura 2. Reactor de mezcla completa sin recirculación	15
Figura 3. Reactor de mezcla completa con recirculación	15
Figura 4. Reactor anaerobio de flujo ascendente con lecho de lodo UASB	16
Figura 5. Biodigestor de cúpula fija o tipo chino	18
Figura 6. Corte transversal de un biodigestor de cúpula fija o modelo chino	18
Figura 7. Biodigestor de cúpula móvil	19
Figura 8. Biodigestor de flujo pistón – PFR	20
Figura 9. Fotografía de la caseta de almacenamiento de pulpa de café en la finca La Gloria del municipio de Fredonia (Antioquia)	22
Figura 10. Modelo de reactor anaerobio discontinuo o por lotes, alimentado con lodo activado, agua y pulpa de café como sustrato, para la producción de biogás y su respectiva cuantificación por el método de desplazamiento de líquido	25
Figura 11. Fotografía de los 10 envases en los que se adicionó agua y lodo activado en cinco diferentes diluciones antes de verter la pulpa de café	26
Figura 12. Fotografía de los 10 reactores con el sustrato de pulpa de café, lodo activado y agua, hasta completar volúmenes iguales de 2,5 L aproximadamente	27
Figura 13. Medición del pH de cada reactor	27
Figura 14. Fotografía de los reactores al momento de iniciar las pruebas de laboratorio	28
Figura 15. Fotografía de los reactores después de 15 días de ensayos	29
Figura 16. Representación gráfica de un reactor flujo pistón –PFR– de 400 L, para producción de biogás y lodo estabilizado	29
Figura 17. Proceso de fabricación de un tanque longitudinal de 400 L	30
Figura 18. Fotografía del reactor PFR de 400 L construido para producir biogás con pulpa de café como sustrato	31

Figura 19. Producción de biogás en 100 días de ensayo por cada reactor	36
Figura 20. Producción de biogás por cada par de reactores en 100 días de ensayos.	37
Figura 21. Producción de biogás en el biodigestor 1	39
Figura 22. Producción de biogás en el biodigestor 4	39
Figura 23. Producción de biogás en el biodigestor 6	40
Figura 24. Producción de biogás en el biodigestor 9	40
Figura 25. Cantidad de biogás producido durante 30 días de prueba	44
Figura 26. Producción de biogás en el PFR de 400 L	45
Figura 27. Producción de lodo estabilizado en el PFR de 400 L	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de una muestra de pulpa de café del municipio de Fredonia (Antioquia)	9
Tabla 2. Bacterias involucradas en la digestión anaerobia	14
Tabla 3. Caracterización típica del agua residual municipal	23
Tabla 4. Agua y lodo activado adicionados a los biodigestores antes de verter la pulpa de café	25
Tabla 5. Dosificación de reactivos adicionados en cada reactor, con sus respectivos porcentajes	26
Tabla 6. Valores de pH inicial y final medidos en cada reactor, así como cantidad de Hidróxido de Sodio (NaOH) adicionado	28
Tabla 7. Producción diaria de biogás (mL) en los biodigestores a nivel de laboratorio	34
Tabla 8. Temperatura ambiental y producción de biogás y lodo estabilizado en el PFR	43

RESUMEN

Hace algunos lustros se presenta un problema que aqueja al municipio de Fredonia-Antioquia, a las zonas cafeteras de Colombia y en general a todos los países productores de café, el cual es la contaminación de aguas, suelos y aire debido a que la pulpa de café generalmente es arrojada a las fuentes hídricas o abandonada a cielo abierto luego de procesar la cereza para la obtención de la semilla, que es la que finalmente se consume a nivel mundial. Por estas malas prácticas también se pierden valiosos productos que pueden ser aprovechados por los mismos caficultores o por personas y entidades interesadas en el tema.

En esta investigación se realizaron ensayos para producir biogás durante 30 días en un reactor flujo pistón -PFR- alimentado con pulpa de café, obtenida de la finca cafetera La Gloria ubicada en el municipio de Fredonia-Antioquia, lodo activado procedente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del mismo municipio y agua natural. La dosificación del sustrato, para un PFR de 400 L de capacidad y de fabricación artesanal, se determinó con base en ensayos de laboratorio realizados en 10 biodigestores discontinuos o por lotes de 3,0 L de capacidad cada uno, durante 100 días.

El PFR se puso en funcionamiento durante 30 días con una dosis diaria de sustrato de 3,4 L/día, de los cuales 2,4 L fueron de pulpa de café y 1,0 L de agua. Se obtuvieron así 370,8 L de biogás con un contenido de 61% de CH₄, 36% de CO₂ y 3% de otros gases; así como 36,1 L de lodo estabilizado, todo a partir de 268 L de pulpa de café y 114,0 L de agua, lo que indica un rendimiento de 41,52 L de biogás por L de pulpa de café, equivalente a 93,83 L de biogás por Kg de pulpa alimentada al reactor, con base en la densidad de la pulpa de café utilizada que fue de 0,4425 Kg/L. El rendimiento del lodo estabilizado fue de 0,015 L de lodo por L de pulpa de café, equivalente a 0,034 L de lodo por Kg de pulpa.

A su vez se elaboró un documento guía para caficultores y estudiantes de secundaria, en el cual se explican los conceptos básicos de la digestión anaerobia, la forma cómo se fabricó el reactor PFR de forma artesanal y la dosis diaria de sustrato para mantenerlo en funcionamiento.

Se pudo concluir que la generación de biogás a partir de pulpa de café en un PFR es un proceso interesante en cuanto a la cantidad de biogás obtenido y de lodo estabilizado, útil como biofertilizante, dejando camino por recorrer en la investigación en cuanto a la calidad e inocuidad de los materiales obtenidos y la consecuente utilización de los mismos.

PALABRAS CLAVE: PULPA DE CAFÉ; BIODIGESTOR; REACTOR PFR; DIGESTIÓN ANAEROBIA; BIOGÁS.

INTRODUCCIÓN

Cuando se habla del café y su papel en la economía mundial se está frente a uno de los productos más comercializados a nivel mundial, pues “según la Organización Internacional del Café (ICO, por sus siglas en inglés) el café es el segundo producto más comercializado después del petróleo. No hay duda que es una de las bebidas más consumidas del planeta. Su producción mundial se estima entre 110 y 120 millones de sacos por año, según Coffee-statistics” (Welfare and Coffee, 2012). Pero aunado a ello existe una gran problemática relacionada con la disposición final de la pulpa del café, pues, como advierte Rodríguez (2010) es un material altamente contaminante de aguas, suelos y aire si no se utiliza adecuadamente.

El municipio de Fredonia-Antioquia es reconocido por ser uno de los principales productores de café en el suroeste del departamento, razón por la cual vive dicha problemática ambiental y social. De ahí que todas las alternativas que se propongan para solucionar o por lo menos aliviar en parte el problema son bien recibidas y puestas en marcha cuando la situación lo amerite.

De acuerdo con Corona (2007, p.52), actualmente se utilizan en muchas partes del mundo diferentes tipos de reactores anaerobios para la depuración de aguas cargadas con materia orgánica y en el proceso se generan algunos gases, principalmente metano, que a veces son utilizados como fuente energética y también lodo que una vez seco se puede utilizar como mejorador de suelos.

En este trabajo se buscó la forma de aprovechar la pulpa de café utilizando uno de estos reactores, con el fin de contribuir a la protección del medio ambiente y a su vez obtener un producto de gran utilidad energética como es el gas metano presente en el biogás.

Se planteó como objetivo general producir biogás en un Reactor Flujo Pistón –PFR– empleando pulpa de café como sustrato. Para tal efecto se propuso construir un PFR que fuera económico en sus materiales y de fácil fabricación, con el fin de brindar una asesoría sencilla y práctica a quienes se interesen en el tema, de manera que se convierta en una alternativa para aprovechar la pulpa de café. Además, se elaboró un documento guía para caficultores y estudiantes de bachillerato, relacionado con la forma de producir biogás a partir de dicha pulpa en un digestor anaerobio y además generar lodo estabilizado como subproducto.

1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La presente investigación plantea un problema que aqueja desde hace muchos años al municipio de Fredonia -Antioquia-, a las zonas cafeteras de Colombia y en general a todos los países productores del grano, el cual es la inadecuada disposición de la pulpa del café, ya que generalmente es arrojada a las fuentes hídricas o abandonada a cielo abierto luego de procesar la cereza para la obtención de la semilla, que es la que finalmente se consume a nivel mundial. Estas malas prácticas ocasionan graves daños al medio ambiente pues contaminan fuentes hídricas, suelos y aire; además de que no se aprovechan los nutrientes de estos residuos, que pueden ser utilizados por los caficultores o por personas y entidades que se interesen en el tema.

Según datos publicados por Houbron, Cano, Reyes y Rustrian (2007), “la pulpa de café presenta un contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de 16,5 a 18,3 por ciento, 9,5 a 11,6 por ciento y 17,5 a 20,5 por ciento, respectivamente, lo cual en promedio representa un 30 por ciento de materia orgánica difícilmente disponible para las bacterias bajo las condiciones de un tratamiento anaerobio”. Además, luego de caracterizar las aguas residuales del beneficio del café reportaron que la presencia de cafeína, el pH ácido y su alta fermentabilidad limitan las posibles aplicaciones para su uso en alimentación, riego o transporte de sustrato para un proceso de biotecnología. Esta situación convierte a dichas aguas residuales y a la pulpa de café en un material altamente contaminante de aguas y suelos, aunado a los procesos de fermentación que generan malos olores y proliferación de vectores en el ambiente.

Respecto a la pulpa o residuos que se generan en el mundo al beneficiar el café no se encuentran datos específicos acerca de las cantidades, pero basta con considerar que “solamente se utiliza el 9,5% del peso del fruto fresco en la preparación de la bebida, el 90,5% queda en forma de residuo” (Calle, 1997, citado por Rodríguez, 2010, p.2). Estos datos dejan entrever el grave problema ambiental que genera la pulpa de café en los países productores, pero a su vez, si se le mira con buenos ojos, es alentador buscar alternativas de solución por el enorme potencial económico, ambiental y social que representa.

En el año 2010 en Colombia el promedio de la producción de pulpa de café fue de 2,25 ton/ha-año. Por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra que Colombia exporta, se generan 162.900 toneladas de pulpa fresca, que “si no se utilizan adecuadamente producirían una contaminación equivalente a la generada durante un año, en excretas y orina, por una población de 868.736 habitantes” (Rodríguez y Zambrano, 2010, p.2).

El municipio de Fredonia –Antioquia– es de vocación cafetera, ya que como lo reporta Jaramillo (2016), el municipio cuenta con 1.321 caficultores, quienes cultivan 2.436 hectáreas en 37 veredas. Además se caracteriza por su riqueza hídrica y de suelos, los cuales se encuentran seriamente amenazados por malas prácticas de algunas personas y

comunidades, principalmente en épocas de cosecha de café, pues la mala disposición de la pulpa ocasiona daños irreversibles al medio ambiente.

Con base en estas apreciaciones y estudios generales del problema planteado se ha encontrado, según Rodríguez y Zambrano (2010), que la transformación de los residuos del café en biogás, a través de biodigestores anaerobios, es un reto para el sector cafetero y para los gobiernos, su implementación no es muy acogida básicamente por la relación costo-beneficio debido a los gastos que se requieren en inversión tecnológica y mano de obra, comparados con el costo de la energía eléctrica y del gas de consumo residencial, ambos de fácil acceso en Colombia. Sin embargo debido a los altos costos de los combustibles fósiles y su inestabilidad en el precio y dado que la energía obtenida de la pulpa del café proviene de recursos renovables es una alternativa a tener en cuenta para depurarla, estudiarla, tecnificarla e implementarla en la medida de lo posible. Cabe destacar, entonces, que la solución específica que se investigó en este trabajo fue la producción de biogás y fertilizante en un reactor flujo pistón -PFR- alimentado con pulpa de café.

En el caso de los biodigestores, es importante tener en cuenta que sólo se dispone de pulpa en épocas de cosecha, que en Colombia y particularmente en Antioquia y Fredonia se presentan en los meses de octubre a diciembre y la llamada travesía que se da en los meses de marzo y abril. No obstante, un biodigestor alimentado con pulpa de café tiene todas las posibilidades de funcionar eficientemente con otros materiales como tallos, hojas, frutos y en general con materia orgánica.

Los análisis y estudios previos del problema permiten concluir, como lo afirma Rodríguez (2010), que la pulpa de café ha sido fuente de contaminación de aguas, suelos y aire en zonas productoras. El caficultor opta por hacer mala disposición de estos residuos en principio por desconocimiento de las consecuencias adversas para el medio ambiente, más tarde por indiferencia y falta de formación ecológica, ahora por falta de capacidad económica o por desconfianza a procesos comunitarios asociativos, aunados a la desatención estatal.

2. JUSTIFICACIÓN

La producción cafetera no es una actividad únicamente agrícola, pues como señala la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2014), existe un proceso industrial conocido como beneficio que se encarga de eliminar la pulpa y el mucílago para obtener el grano de café. El beneficio del café genera unos residuos, entre ellos la pulpa, que por su mala utilización y disposición es altamente contaminante de aguas, suelos y aire, lo que amerita investigar acerca del aprovechamiento de dicho subproducto y la implementación tecnológica para su uso final. Con este proyecto se busca que los caficultores hagan un uso adecuado de la pulpa de café, en beneficio de su propia economía, de su salud y de sus comunidades.

Los residuos del beneficio del café, que según Café de Colombia (2015), también son llamados coproductos, son de gran utilidad y ofrecen buenas alternativas ecológicas, económicas y sociales; desde la producción de biogás, bioetanol, compost, lixiviados y lombricultivos, hasta llegar a las últimas tecnologías de producción de alimentos para animales y humanos.

Este trabajo se enfoca en la producción de biogás en un reactor PFR empleando pulpa de café como sustrato, pues la digestión anaerobia, según Palacio (2007), es un proceso altamente eficiente en la generación de biogás con alto potencial energético, el cual puede ser otra fuente de ingreso o un ahorro para el caficultor que se beneficie de este producto.

El medio ambiente será impactado positivamente, pues las fuentes de agua recibirán menos descargas que las actuales a causa del proceso del beneficio del café; igual sucederá con el aire ya que disminuirán las emisiones de gases generados por la fermentación de la pulpa en descomposición y mermarán los malos olores. Los suelos serán mejorados por el uso de lodo estabilizado, el cual será obtenido como subproducto del reactor PFR.

Se espera que con el documento guía para caficultores y estudiantes de secundaria se beneficie buena parte de la población escolar y campesina, pues será fuente de consulta para quienes deseen producir biogás a partir de pulpa de café.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Aprovechar la pulpa de café para producir biogás en un Reactor Flujo Pistón –PFR– de fabricación artesanal.

3.2 Objetivos específicos

- 3.2.1 Realizar ensayos preliminares de la digestión anaerobia a nivel de laboratorio empleando pulpa de café como sustrato.
- 3.2.2 Construir un digestor tipo PFR para la puesta a punto de la producción de biogás a partir de la pulpa de café.
- 3.2.3 Elaborar un documento guía para caficultores y estudiantes de bachillerato en el que se explique la forma de producir biogás en un PFR empleando pulpa de café como sustrato.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 El cultivo del café

4.1.1 El café en el mundo

Según datos de la FAO -Organización para la Alimentación y la Agricultura- (2010, p. 31), el café es el segundo producto más comercializado en el mundo, después del petróleo. El primer productor es Brasil, seguido por Vietnam, Colombia, Guatemala, Etiopía y muchos otros, principalmente ubicados en zonas ecuatoriales. Se calcula que unas 125 millones de personas viven de su cultivo y que el consumo anual es de 400.000 millones de tazas con base en la producción de 2010 que fue de unos 7 millones de toneladas o 117 millones de sacos. El café se comercializa en sacos o bolsas de 60 kilogramos de las variedades arábica y robusta, principalmente.

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2010), señala que desde el punto de vista científico se presta enorme atención a los efectos de la producción de café sobre la biodiversidad, pues se buscan cambios en los sistemas de producción agrícola que sean amigables y ambientalmente sostenibles. Pero es fundamental tener en cuenta la gran diversidad de países productores de café y las diferentes zonas productoras de dichos países, pues los efectos ambientales de producir café son muy diferentes en el Norte de Brasil, en el Sur de México, en Costa de Marfil, en Vietnam y en Colombia, debido a que los suelos son de orígenes distintos, las fuentes hídricas varían en calidad y cantidad, el clima, las precipitaciones y la radiación solar, entre otros factores, por lo que es difícil hacer generalizaciones para imponer sistemas de producción y beneficio del café.

No obstante es necesario, como en todos los cultivos modernos, proteger las fuentes de agua, el suelo, el aire y la biodiversidad, tanto en los procesos productivos como en la post cosecha.

4.1.2 El café en Colombia

Colombia es uno de los principales productores de café en el mundo y es el primero en calidad, según la Federación Nacional de Cafeteros (2010), que es la entidad que más vela por los intereses de los campesinos que viven de este cultivo y en general de todos los que trabajan en el ramo.

Los principales cultivos de café en Colombia se encuentran ubicados entre los 1000 y 2000 m.s.n.m., por lo tanto los departamentos de Antioquia, Cundinamarca, Tolima, Quindío, Risaralda y Caldas son los principales productores en el país. De acuerdo a datos estadísticos “la producción de café de Colombia creció 83% en los últimos cuatro años, al pasar de 7,7 millones en 2012 a 14,2 millones de sacos de 60 kilos en 2015” (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2016, p.1), lo que de acuerdo con Calle (1997, citado por Rodríguez, 2010, p.2) generó en el año 2015 cerca de 12,85 millones de residuos, equivalentes al 90,5% de la producción de café.

Por su parte la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia –FEDECAFE– reportó en su página web “Café Paisa” que “en los últimos 12 meses, que coinciden con el año cafetero octubre 2015-septiembre 2016, la producción de Café de Colombia superó los 14 millones de sacos, un aumento del 5% con respecto a los 13,3 millones de sacos del mismo periodo anterior”. De dicha producción se exporta la mayor parte, tal como lo reporta FEDECAFE al afirmar que “en línea con la producción, las exportaciones de café de Colombia crecieron en el año 2016 y se ubicaron en 12,4 millones de sacos de 60 kilos, un 3% más que los 12 millones vendidos en el exterior en igual lapso anterior”. Estos datos permiten deducir que es alta la cantidad de pulpa de café que se genera y que queda dentro de las zonas cafeteras del país.

4.1.3 El café en el municipio de Fredonia –Antioquia

De acuerdo con Ramírez, R. y González, S. (2010, p. 129), el municipio de Fredonia está localizado en las estribaciones de la cordillera Central de Colombia, en la subregión del Suroeste del departamento de Antioquia. Limita al norte con los municipios de Caldas, Amagá y Venecia, al oriente con Santa Bárbara, al occidente con Jericó y Tarso y al sur con La Pintada, Valparaíso y Támesis. Fredonia fue erigido municipio en 1830 cuando contaba con menos de 4 mil habitantes. Fue fundado por los señores Cristóbal Uribe Mondragón y José Antonio Escobar Trujillo.

Según datos del Departamento Nacional de Estadística –DANE- (2005), Fredonia tiene una superficie de 247 km², temperatura promedio de 20°C, contaba en 2005 con una población total de 21.561 habitantes distribuida así: población urbana: 8.580, población rural: 12.981. El alfabetismo es de 84.1% (2005) distribuido así: zona urbana: 88.7%, zona rural: 81.0%. La altitud de la cabecera municipal (metros sobre el nivel del mar) es de 1.800 msnm y se encuentra a 58 Km de distancia de Medellín.

En Fredonia “se dio inicio a la siembra del café en el año de 1881, cuando Mariano Ospina Rodríguez sembró las primeras semillas traídas de Guatemala, en compañía de Eduardo Vélez. Arrieros aferrados a sus mulas fueron poblando a Fredonia” (Londoño, 2016, p.7). El cultivo del café en Fredonia se realiza sobre suelos que proporcionan, en su parte agronómica, las condiciones ideales para la producción del café, con materia orgánica y

buenos nutrientes para su correcto desarrollo. En la actualidad el municipio es conocido a nivel mundial como la cuna del mejor café del mundo representado por el café tipo suave marca Medellín.

Un ícono publicitario del café fredonita es el mundialmente conocido Juan Valdez con su mula Conchita, oriundo de Fredonia y llamado realmente Carlos Sánchez, ataviado de poncho, carriel y ruana publicitó el grano en Estados Unidos durante unos 37 años hasta su jubilación en 2006 por parte de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Hoy las tiendas Juan Valdez se encuentran en las principales ciudades del mundo como garantía de calidad del café colombiano.

Una caracterización fisicoquímica de pulpa de café del municipio de Fredonia fue realizada por Franco, Z. (2017), y se muestra en la Tabla 1. En ella se analizó una muestra de pulpa fresca y otra después de la fermentación sólida.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de una muestra de pulpa de café del municipio de Fredonia (Antioquia).

Parámetros	Pulpa Fresca	Pulpa Fermentada
Humedad (%)	80,11	85,16
pH	4,26	9,23
DQO (ppm)	1,092	
Fósforo (Absorbancia)	0,036	0,042
Metales (ppm)		
Ca(1/25)	111,75	
Mg(1/25)	13,3	
Cu	0,04	
Fe	0	
Ni	0,15	
Nitrógeno		
Kjeldhal (ppm)	1430,36	
Kjeldhal (%)	0,143	
N Proteína (%)	8,94	
Azúcares (mg/L)		
Sacarosa	15,692	
Glucosa	365,785	
Fructosa	734,747	
Ácido acético (mg/L)	58,972	
Etanol (mg/L)	100,379	

Fuente: Franco, Z. (2017)

4.2 Residuos generados en la industria del café

En diferentes lugares del mundo el beneficio del café se hace de diferentes maneras; una de ellas, señalada por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2010), es el

beneficio seco, proceso que consiste básicamente en el secado al sol durante varios días hasta que se llegue a ciertos rangos de humedad, lo que hace que los azúcares impregnen la semilla y la bebida final adquiera un sabor característico no muy aceptado por los consumidores. Otro método de beneficio del café y que a su vez es el más utilizado por su aceptación a nivel mundial es el beneficio húmedo, que incluye el despulpado, la fermentación, el lavado y el secado del grano. Este proceso termina con la retirada del mucílago por fermentación del grano en tanques o mecánicamente y puede durar entre 12 y 18 horas.

De acuerdo con Rodríguez (2010), la pulpa que queda después de descerezar el café tiene gran cantidad de aplicaciones en la industria y a nivel de la hacienda campesina, pues sus propiedades químicas y físicas hacen de ella una importante materia prima. La pulpa es utilizada en la producción de alimentos para animales, lombricultivo, compost, fertilizantes, generación de energía como biogás y bioetanol, y hasta las industrias de bebidas y dulces hacen investigaciones cada vez más especializadas.

Como advierten Rodríguez y Zambrano (2010), la pulpa de café es el primer producto que se obtiene en el procesamiento del fruto, conocido como beneficio y representa en base húmeda alrededor del 43,58% del peso del fruto fresco. La industria del café consume el resto del grano representado en la almendra o semilla del cual se saca la bebida y los productos que consume la humanidad, los subproductos son desechados en su mayoría convirtiéndose en contaminantes de aguas, suelos y aire.

En Guatemala, la Asociación Nacional del Café –ANACAFÉ– (2015), ha reportado que la pulpa de café tiene un alto contenido de humedad, lo que implica que su secado sea difícil si se hace por prensado, consumiendo mucha energía en dicho proceso, además el líquido obtenido es muy contaminante por su alta demanda química de oxígeno –DQO– convirtiéndose en un problema más difícil de resolver que el del agua resultante del beneficio del grano. El secado de la pulpa al sol y al aire requiere de mucho tiempo, trabajo y espacio para su disposición, por lo que dicho proceso genera grandes pérdidas para el caficultor o para quien pretenda aprovechar este subproducto del café.

La pulpa y la cascarilla son los dos residuos que van quedando sin uso en el beneficiado del café, pero en países centroamericanos se les aplica un proceso llamado peletizado, el cual consiste en someter estos residuos a trituración, secado, molienda, prensado y enfriado hasta obtener un producto de forma cilíndrica cuyas medidas aproximadas están entre 25 y 60 mm de longitud y entre 6 y 20 mm de diámetro según lo reporta Girón (2008), los cuales se usan para reemplazar la leña y el carbón y en la actualidad se utilizan para generar energía eléctrica.

En Cuba “según estudios del Centro de Investigaciones del Café, la pulpa deshidratada se comporta como buen combustible, capaz de proveer hasta 4200 Kcal/Kg” (Castillo, Carballo y Pérez, 2008, p.1), pero de la quema directa o en briquetas resulta una energía térmica

con muy bajo contenido calórico, además de que desprende contaminantes gaseosos como dióxido y monóxido de carbono, nitratos y sulfatos. A su vez, la gasificación permite obtener un gas de baja producción calórica pero poco contaminante, lo que hace que sea útil para la obtención de energía térmica y eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas.

Por su parte, el mucílago de café, que es el líquido que recubre la semilla y la protege para que esté en óptimo desarrollo, equivale al 20% del grano y es otro coproducto que resulta de su procesamiento, también es altamente contaminante. Zambrano, citado por Rodríguez y Zambrano (2010) afirma que, el mucílago de café en base húmeda representa alrededor del 14,85% del peso del fruto fresco y podría ocasionar en Colombia una contaminación equivalente a la generada en un año, en excretas y orina, por una población de 310.000 habitantes. También reporta que se pueden obtener 336 L de metano por 1 kg de DQO removido y puesto que el metano tiene un poder calorífico de 35,78 KJ/L, se puede estimar que la energía contenida en el biogás generado a partir de la descomposición de 1 Kg de mucílago fresco es del orden de 2 MJ.

Palacio (2007), reporta que en promedio un kilogramo de biomasa permite obtener 3.500 Kcal y que un L de gasolina tiene aproximadamente 10.000 Kcal, lo que indica que por cada tres kilogramos que se desperdicia de biomasa se desaprovecha el equivalente a un L de gasolina.

Señala Montoya (2014), que la generación de energía eléctrica a partir de la pulpa de café es una tecnología que se está implementando en varios lugares de Antioquia con el apoyo de la Corporación Autónoma Regional de Antioquia – Corantioquia-, entre ellos en la vereda La Florida del municipio de Betulia, donde se construyó un reactor a partir de mampostería en eco-ladrillos alimentado únicamente con pulpa de café.

4.3 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es una de las tecnologías más utilizadas en la transformación de la biomasa y se hace a través de reactores anaerobios, en los cuales un cultivo de bacterias en ausencia de oxígeno molecular actúa sobre la materia orgánica fermentada, transformándola en energía en forma de gas combustible –metano- y lodo estabilizado de fácil disposición y útil como biofertilizante. “La vía anaerobia producirá el equivalente de 3 kW/h como energía química acumulada en el metano, la cual puede ser convertida en una máquina de combustión acoplada a un generador eléctrico de eficiencia media (20%), lo que resulta en 0,6 kW de energía eléctrica/Kg de DQO removida” (Castillo, Carballo y Pérez, 2008, p.2).

Cabe señalar que “en los procesos anaerobios, el 90% de la energía, contenida en la materia orgánica, medida como demanda química de oxígeno (DQO), es convertida en

biogás y el 10% restante es asimilado para la generación de nuevas células” (Bote, T., 2013, p.3).

La mezcla de gases que conforman el biogás generado en la digestión anaerobia, “está compuesta, fundamentalmente, de metano (50-70% CH₄), dióxido de carbono (30-50% CO₂), sulfuro de hidrógeno (<2% H₂S) y otros gases (NH₃, N₂, etc.). El metano es el principal gas combustible y la mezcla de gases tiene una potencia calorífica en torno a 5.500 kcal/m³ (con un 60% de CH₄)” (Palau, C., 2016, p.15).

El proceso biológico de digestión anaerobia, en el que participan diversas poblaciones de bacterias, se realiza de forma natural en cuatro etapas o fases: hidrólisis de la materia orgánica, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La Figura 1, adaptada de Palau (2016), muestra cada una de estas fases con sus respectivas condiciones.

El desarrollo de las diferentes poblaciones bacterianas y por ende los buenos rendimientos de producción de biogás están condicionados por “las características de la materia prima – humedad, carga orgánica, posibles inhibidores, etc.- y los parámetros ambientales y operacionales del sistema” (Elías, 2005; citado por Palau, 2016). Uno de los parámetros ambientales más significativos es la medición del pH, cuyo valor óptimo está alrededor de 7, aunque se puede operar en el intervalo de 6,5 a 7,5. Si se encuentra por debajo de 4,5-5 puede inhibir la actividad microbiana, lo que “puede deberse a varias causas como una carga orgánica excesiva, amplias variaciones de temperatura, acumulación de costra en el digestor, presencia de sustancias no deseables, etc.” (Palau, 2016, p.5). Valores de pH por encima de dicho rango también ocasionan problemas similares, ya que desestabilizan el digestor al inhibir la fase metanogénica.

De acuerdo con Bote (2013), el pH no deberá bajar de 6 ni subir de 8, para que el proceso funcione eficientemente, ya que los diferentes grupos bacterianos que participan en el proceso de digestión anaerobia presentan niveles de actividad óptimos en torno a los siguientes valores: Fermentativos entre 7,2 y 7,4, acetogénicos entre 7,0 y 7,2 y metanogénicos entre 6,5 y 7,5. Algunas de las principales bacterias presentes en el proceso de digestión anaerobia se presentan en la Tabla 2.

La temperatura es otro factor ambiental importante en el proceso de digestión anaerobia, ya que de ella dependen las velocidades de reacción de cualquier proceso biológico, la composición del biogás debido a la relación entre la solubilidad de los diferentes gases con la temperatura y el daño que pueda causar a los microorganismos presentes en el medio después de ciertos valores. “Se han definido dos rangos de trabajo donde puede efectuarse satisfactoriamente la anaerobiosis de aguas residuales. Ellos son los siguientes: mesófilico entre 20 y 45°C y termófilico entre 45 y 60°C” (Lorenzo, Y. y Obaya, M. 2005, p.41). Afirman estos autores que se reconocen en general como temperaturas óptimas las de 35 y 55°C para los tratamientos mesófilos y termófilos, respectivamente y aducen que en climas subtropicales y tropicales se puede trabajar a temperatura ambiente en gran parte del año, porque las fluctuaciones son pocas.

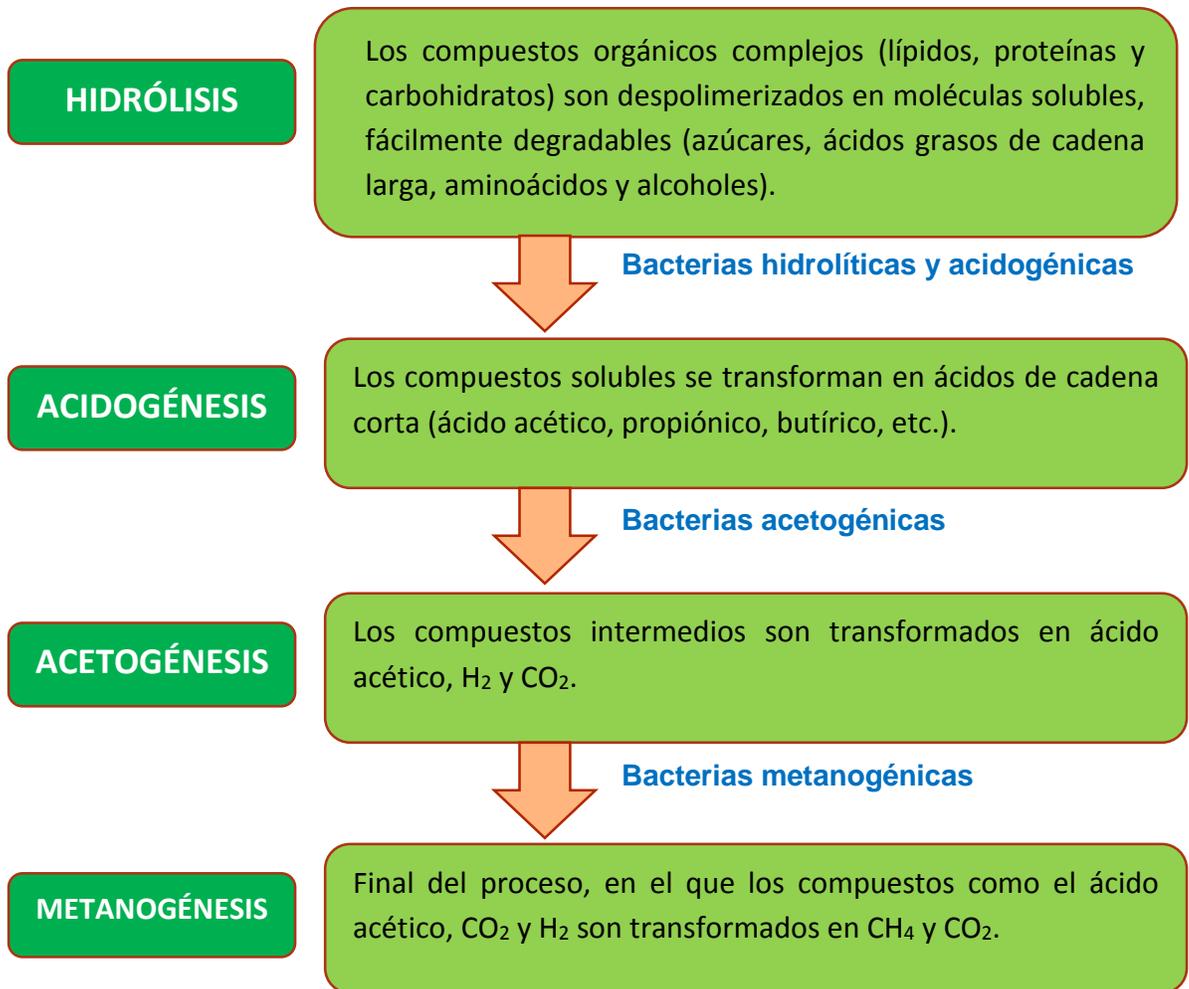


Figura 1. Etapas del proceso de digestión anaerobia.
Fuente: Adaptado de Palau (2016, p.4).

Tabla 2. Bacterias involucradas en la digestión anaerobia.

Etapa	Género/Especie	Población mesofílica en lodos residuales
Hidrolíticas, acidogénicas	Butyvirbio, Clostridium, Ruminococcus, Acetovibrio, Eubacterium, Peptococcus, Lactabacillus, Streptococcus, etc.	$10^8 - 10^9$ por mL
Acetogénicas Homoacetogénicas	Acetobacterium, Acetogenium, Eubacterium, Pelobacter, Clostridium, etc.	$\approx 10^5$ por mL
Reductoras de protones estrictos	Metanobacillus omelionskii, Sintrophobacter wolinii, Syntrophomonas wolfei, Sintrophus buswelii, etc.	
Metanogénicas	Methanobacterium, Methanobrevibacter, Methanococcus, Methanomicrobium, Methanogenium, Methanospirillum hungatei, etc.	$\approx 10^8$ por mL

Fuente: Bote (2013).

Lorenzo y Obaya (2005), relacionan otros factores principales que influyen en el proceso anaerobio, como son la composición del residual, las cargas orgánicas, los tiempos de retención hidráulica y celular, la acidez, la alcalinidad, el contenido de sólidos, los nutrientes, los tóxicos, entre otros, que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar y operar los diferentes sistemas de digestión anaerobia.

4.4 Sistemas utilizados en la digestión anaerobia

Los diferentes sistemas utilizados para la digestión anaerobia se clasifican de acuerdo a la capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el reactor. Según el IDAE –Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía de España (2014), el reactor de mezcla completa es el más simple y el más utilizado para residuos.

4.4.1 Reactor de mezcla completa sin recirculación

De acuerdo con el IDAE (2014), en este reactor se mantiene una concentración uniforme de sustrato y microorganismos mediante agitación no violenta, mecánica o neumática. Su tiempo de retención es alto debido a que la concentración de la especie que se mantiene en el reactor es igual a la que sale en el efluente. Acá la velocidad de reacción es baja, como en los procesos biológicos, pero se compensa aumentando el tiempo de reacción. La Figura 2 ilustra este reactor.

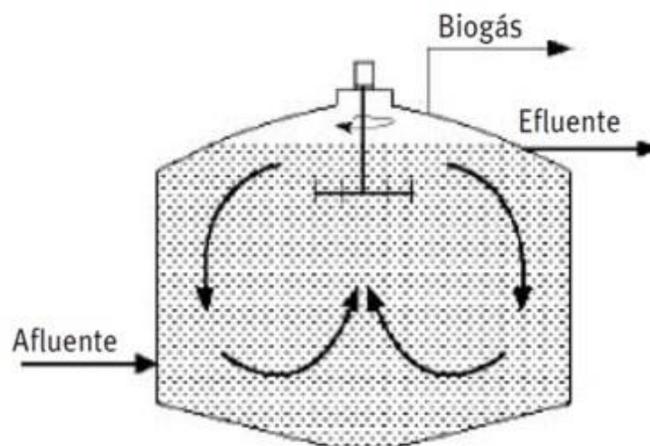


Figura 2. Reactor de mezcla completa sin recirculación.
Fuente: IDAE, 2014, p. 25.

4.4.2 Reactor de mezcla completa con recirculación

Este reactor también se llama “reactor anaerobio de contacto y sería equivalente al sistema de fangos activos aerobios para el tratamiento de aguas residuales” (IDAE, 2014, p.25). Un modelo se presenta en la Figura 3.

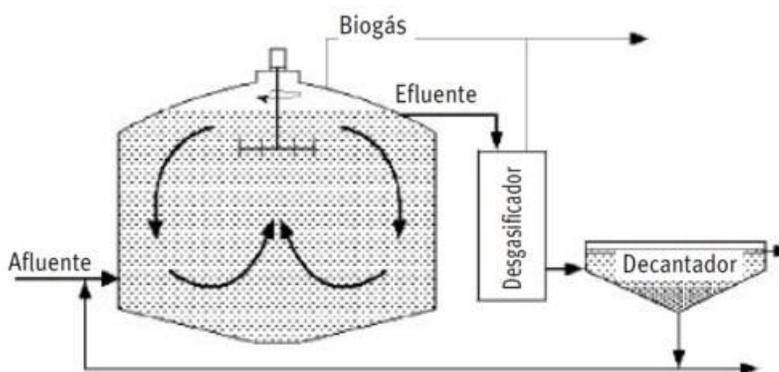


Figura 3. Reactor de mezcla completa con recirculación.
Fuente: IDAE, 2014, p. 25

En este tipo de reactores se pueden conseguir tiempos de retención hidráulica más bajos que en un reactor simple de mezcla completa aumentando el tiempo de retención de los microorganismos. Este sistema sólo se aplica a aguas residuales de alta carga orgánica como las provenientes de azucareras, cerveceras, etc.

4.4.3 Reactor anaerobio de flujo ascendente con lecho de lodo UASB

En la actualidad se utilizan los reactores anaerobios de flujo ascendente con lecho de lodo –UASB-, por sus siglas en inglés *Up flow anaerobic sludge blanket*, en el tratamiento de aguas residuales del beneficio del café, de los cuales se obtiene más del 50% de CH_4 y un poco menos del 50% de CO_2 , además trazas de otros compuestos químicos de poca importancia desde el punto de vista energético. Rodríguez y Zambrano (2010) reportan una proporción de metano que oscila entre 50% y 80% y gas carbónico (CO_2) con pequeñas trazas de otros compuestos.

Según el IDAE (2014), en este sistema la floculación de bacterias forman gránulos que por sedimentación se mantienen dentro del reactor, con velocidad ascendente adecuada del fluido, siempre y cuando en la parte superior exista un separador de biomasa/líquido/gas. Los UASB son muy utilizados para el tratamiento de aguas residuales de industrias agroalimentarias. La Figura 4 muestra uno de estos reactores.

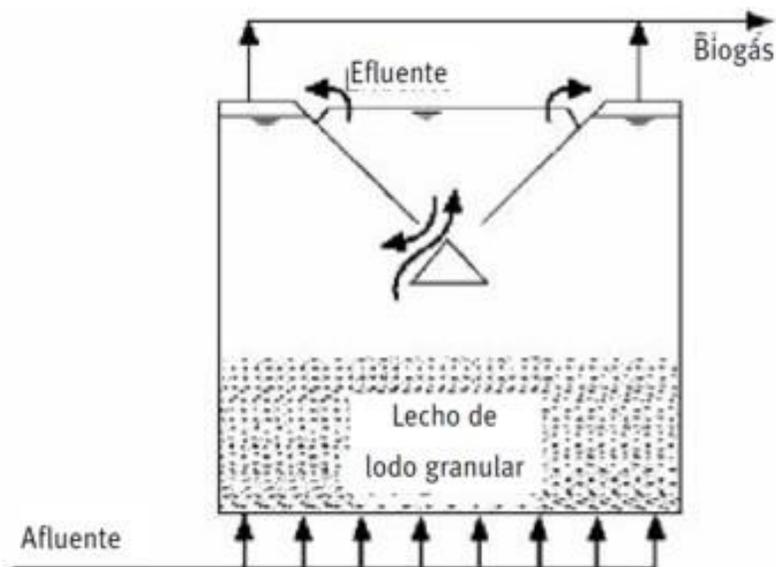


Figura 4. Reactor anaerobio de flujo ascendente con lecho de lodo UASB.
Fuente: IDAE, 2014, p. 27.

4.4.4 Otros reactores anaerobios

Existen otras clasificaciones de los reactores anaerobios, dependiendo de su tamaño, de los residuos a biodegradar, de la forma geométrica del reactor, de las condiciones técnicas y hasta de las regiones del mundo; sin embargo, según López (2012), se conocen en el medio tres tipos de biodigestores:

- Biodigestores de flujo discontinuo, en los que la carga del material a fermentar se hace al inicio del proceso en una sola descarga y al finalizar se descarga todo el efluente. Es inconveniente si hay producción continua de materia prima, requieren altos costos de mano de obra y un depósito de gas.
- Biodigestores de flujo semicontinuo, en ellos la carga del material y la descarga del efluente se hace continua o cada determinado tiempo, entre 12 y 24 horas, en un proceso indefinido. Existen tres de este tipo: De cúpula fija -chino-, de cúpula móvil o flotante -hindú- y biodigestor tipo salchicha, este último también conocido como tubular, Taiwan, CIPAV o biodigestor familiar de bajo costo.
- Biodigestores de flujo continuo, Son grandes, de corte industrial, se utilizan para tratamiento de aguas residuales y producen mayor cantidad de biogás. Entre ellos se encuentran: Sistema de desplazamiento horizontal -movimiento de flujo pistón, gravedad-, sistema de tanques múltiples y sistema de tanque vertical.

A continuación se describen algunos de ellos con un poco más de detalles, de acuerdo a lo expuesto por López (2012).

4.4.5 Reactor de cúpula fija

Generalmente se construyen en una sola estructura de concreto, bloques o ladrillos en forma de domo, bajo la tierra e impermeabilizados en su parte interna. Se requiere mano de obra calificada para su diseño y construcción. En las Figuras 5 y 6 se presentan modelos de dicho reactor.

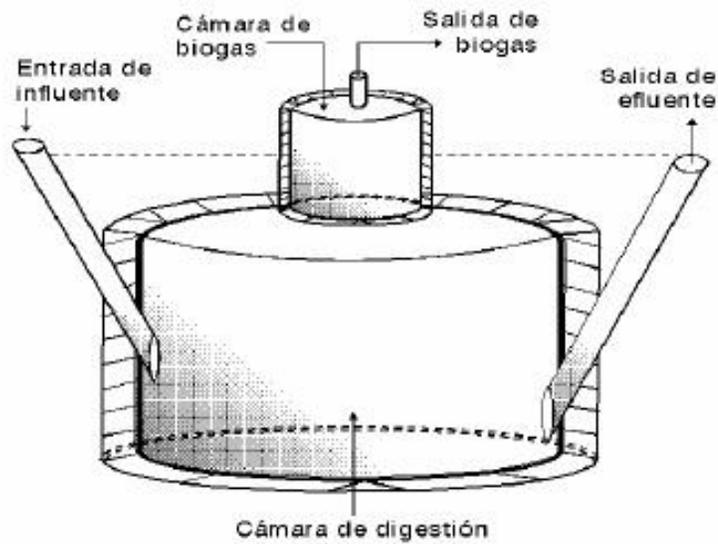


Figura 5. Biodigestor de cúpula fija o tipo chino.
 Fuente: López, A, 2012, p.11.

Este reactor trabaja con presión variable, la presión del gas no es constante y la cúpula debe ser completamente hermética. Los materiales de construcción son de fácil adquisición y tienen una larga vida útil por ser una construcción subterránea.

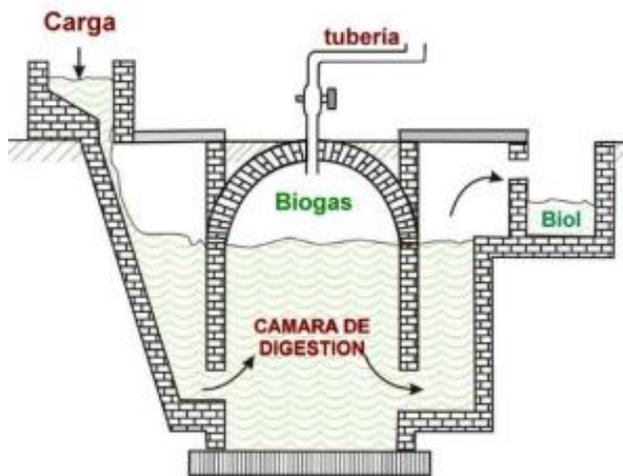


Figura 6. Corte transversal de un biodigestor de cúpula fija o modelo chino.
 Fuente: <https://energiasera.wordpress.com/2009/09/17/clasificacion-de-biodigestores/>

4.4.6 Reactor de cúpula móvil

Estos biodigestores “tienen dos estructuras: la primera al igual que en los de estructura sólida fija, va enterrada y hecha en concreto, bloque o ladrillo; la segunda en la mayoría de los casos es una campana metálica que flota sobre la primera estructura” (López, 2012, p.11). La Figura 7 ilustra la forma de este biodigestor.

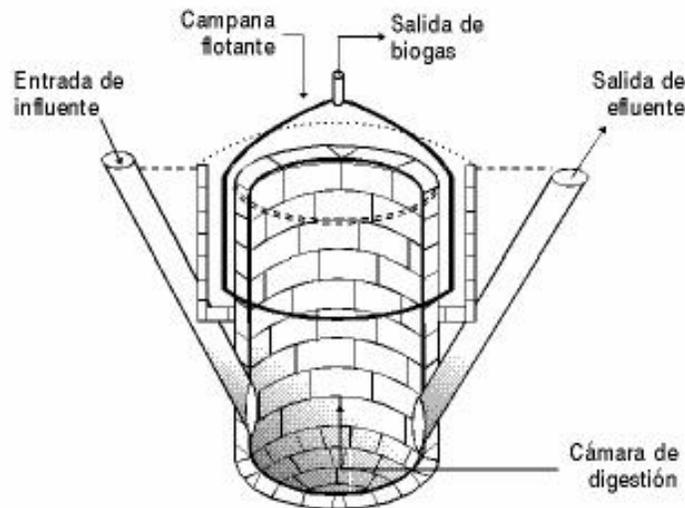


Figura 7. Biodigestor de cúpula móvil.

Fuente: López, A., 2012, p.12.

Tienen un depósito de gas móvil a manera de campana que flota en la masa de fermentación o en un anillo de agua. Trabajan a presión constante y el nivel de la campana indica la cantidad de gas almacenado. La campana generalmente es metálica, por lo tanto puede sufrir corrosión, aunque últimamente se experimenta con fibra de vidrio. Presentan altos costos de construcción y mantenimiento.

4.4.7 Reactor discontinuo o por lotes

De acuerdo con López (2012, p.13), consisten en contenedores cerrados de los cuales no se puede extraer o añadir sustrato hasta el final del proceso de biodegradación y la consecuente producción de biogás. Admiten mayor carga de materiales poco diluidos, por lo tanto requieren menos agua que los sistemas continuos. La producción de gas es menor al principio y al final del proceso, debido a las condiciones difíciles para los microorganismos anaeróbicos al inicio del proceso y al agotamiento de los nutrientes al final.

4.4.8 Reactor Flujo Pistón -PFR

De acuerdo con Schmidt (1998), un reactor utilizado para la digestión anaerobia es el Reactor Flujo Pistón –PFR– el cual funciona en estado estacionario, es decir, que sus propiedades permanecen invariables con el tiempo. Se dice que un fluido circula por un tubo en flujo pistón cuando no existen gradientes radiales y cuando no hay ningún tipo de mezcla -no existe difusión- axial. En este tipo de reactores las reacciones químicas se dan en un sistema abierto, la introducción de reactivos es continua así como la extracción de productos; la temperatura, la presión y la composición varían con relación a la longitud del reactor.

La tasa de crecimiento de los microorganismos es mayor a la entrada del reactor, donde la concentración del sustrato es también más elevada, por lo que la concentración media en todo el reactor es superior a la correspondiente a mezcla completa y siempre superior a la de salida, por lo que el tiempo de retención es inferior. Este reactor se aplica a residuos orgánicos, municipales, residuos de porcino y bovino, etc. “y una de las dificultades es la debida a la falta de homogenización en la sección transversal a la dirección del flujo, en las configuraciones horizontales, lo cual se puede evitar mediante un sistema de agitación transversal –reintroducción de biogás a presión en la base del digestor si el reactor es horizontal, por ejemplo” (IDAE, 2014, p.27). En la Figura 8 se puede observar un diseño típico de un PFR.

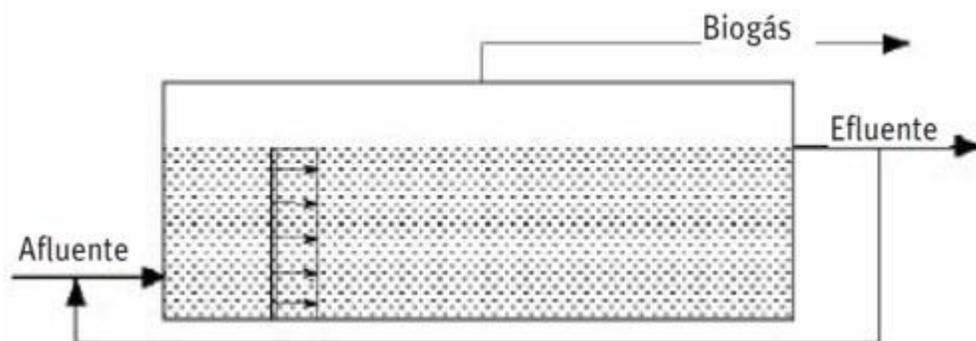


Figura 8. Biodigestor de flujo pistón –PFR.

Fuente: IDAE, 2014, p.27.

De acuerdo con Medina, los reactores PFR son de bajo costo comparado con el de los reactores UASB y otros similares, tipo tanque y su eficiencia es mayor, aunque su costo inicial es alto. Su operación es continua y por lo tanto se puede tener un control automático de la producción. Son recomendables para reacciones de poco tiempo de residencia, pues éste permanece fijo para un flujo dado de alimentación. Se recomiendan para sistemas

reactivos que sean gases y vapores, para producción grande en forma continua y para reacciones exotérmicas o endotérmicas.

Cuando un reactor PFR es alimentado con pulpa de café la eficiencia en producción de biogás y su poder calorífico son altos. Esto se evidencia en el trabajo realizado por Rodríguez y Zambrano donde reportan rendimientos de 25 L de biogás por 1 kg de pulpa fresca alimentado a los digestores. El poder calorífico del biogás, con un contenido de metano de 60%, es de 21,46 KJ/L, con un valor para la pulpa fresca de 0,54 MJ/kg. Palacio (2007) afirma que el contenido de energía del biogás es 21,5 MJ/m³, con 60% de metano, esto significaría una producción de energía eléctrica de 6,35 kWh/m³.

Según Balseca y Cabrera (2011), en ensayos similares obtuvieron 128 L de biogás por kilogramo de pulpa de café. A su vez, Calle y Arcila (1974) citados por Rosa, R. (2015), reportan rendimientos de 25 L de biogás por kilogramo de pulpa fresca alimentada a los digestores.

Otros investigadores afirman que “la cantidad de gas producido es muy variable, aunque generalmente oscila alrededor de los 350 L/Kg de sólidos degradables, con un contenido en metano del 70%”. (Lorenzo, Y. y Obaya, M., 2005, p.36).

5. DISEÑO METODOLÓGICO

Se propuso en esta investigación realizar algunos ensayos a nivel de laboratorio con el fin de cuantificar la producción de biogás a partir de pulpa de café como sustrato y determinar el tiempo de retención de los microorganismos, para luego calcular la cantidad a alimentar en el sistema PFR; para ello se construyeron cinco biodigestores anaerobios discontinuos o por lotes, de 3,0 L de capacidad, cada uno con su respectivo testigo o duplicado. Con los resultados obtenidos de dichos ensayos se determinó un modelo de dosificación para implementarlo en un Reactor Flujo Pistón –PFR– de fabricación artesanal y cuantificar allí la producción de biogás y de lodo estabilizado.

5.1 Obtención de la materia prima

La pulpa de café que se utilizó en la digestión anaerobia se obtuvo de la finca cafetera La Gloria ubicada a 1 Km del casco municipal de Fredonia-Antioquia. Se recolectó la pulpa en bolsas de polietileno, en un día de despulpado y se almacenó en un refrigerador a $\pm 6^{\circ}\text{C}$ por un período inferior a 15 días. Dicho material no contó con ningún tratamiento físico ni químico antes de utilizarse en esta investigación, ya que se busca que el caficultor que desee implementar este tipo de alternativa de aprovechamiento de la pulpa de café no invierta demasiado tiempo y recursos económicos. La Figura 9 muestra el sitio de donde se tomó dicho material.



Figura 9. Caseta de almacenamiento de pulpa de café en la finca La Gloria del municipio de Fredonia (Antioquia).

Para esta investigación se determinó la densidad de la pulpa fresca utilizada en los ensayos tanto a nivel de laboratorio como para el funcionamiento del reactor PFR; dicha densidad arrojó un valor de 0,4425 Kg/L.

El lodo activado que se necesitó para las pruebas preliminares y para el reactor PFR fue procedente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Fredonia-Antioquia. Se recolectó en recipientes de polipropileno y se almacenó en un refrigerador a +/- 6°C por un período inferior a 7 días.

De acuerdo con el Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (2002, p. 13), las aguas residuales municipales son esencialmente aquellas que han sido utilizadas para uso doméstico –consumo humano, cocimiento de alimentos, aseo personal y local, etc.– y productivas –lavados, diluciones, calentamientos, refrigeración, etc. – y que son vertidas a los alcantarillados domiciliarios o directamente al ambiente. También indica que los principales contaminantes de las aguas residuales domésticas son las heces y la orina humana. De ahí que las características físicas, químicas y bacteriológicas varían de población a población, sin embargo presentan una caracterización que puede considerarse general para el país y que se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Caracterización típica del agua residual municipal.

Componente	Concentración (mg/L)		
	Alta	Media	Baja
Sólidos totales	1000	500	200
Sólidos suspendidos	500	300	100
Sólidos sedimentables	12	8	4
Demanda bioquímica de oxígeno, DBO ₅	300	200	100
Demanda química de oxígeno, DQO	1000	500	250
Nitrógeno total	80	50	25
Fósforo total	20	15	5
Grasas y aceites	40	20	0
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	10 ⁹	10 ⁷	10 ⁵

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (2002, p. 14).

El agua utilizada tanto para los ensayos preliminares como en la puesta en marcha del PFR durante 30 días de prueba, se tomó de una fuente natural próxima al sitio de investigación en el municipio de Fredonia. Los envases PET utilizados en las pruebas a nivel de laboratorio fueron reciclados, procedentes de refrescos consumidos. Los materiales utilizados para construir el reactor PFR fueron reciclados en su mayoría.

5.2 Ensayos preliminares de la digestión anaerobia a nivel de laboratorio

Con el fin de cuantificar el biogás producido en biodigestores anaerobios por lotes, de 3,0 L de capacidad, alimentados con agua, lodo activado y pulpa de café como sustrato, se fabricaron 10 de ellos a nivel de laboratorio. Dicha cuantificación de biogás se hizo por el método de desplazamiento de líquido, el cual, según Parajuli (2011), consiste en conducir el biogás producido, a través de una manguera, hacia un recipiente que contenga líquido y allí, gracias a la presión del biogás sobre la superficie del líquido, éste se desplaza a través de otra manguera hacia un recipiente donde puede ser medido su volumen.

Para construir los biodigestores a nivel de laboratorio se emplearon 10 envases de polipropileno (PET) de 3,0 L, cinco de ellos se tomaron como diseño experimental y los otros cinco como testigos o duplicados. Cada uno de los recipientes se alimentó con pulpa de café, lodo activado y agua natural.

A cada taparrosca de los envases PET se le hizo un agujero de aproximadamente 6 mm de diámetro (1/4 de pulgada) y luego se le colocó un tapón de hule por la parte interna de la tapa, se cerraron los envases y se introdujeron en un balde con agua para comprobar su hermetismo.

Seguidamente se retiraron los tapones de hule y se conectó a cada taparrosca una manguera de 1/4 de pulgada de diámetro y de 50 cm de largo, la cual se emboquilló desde el borde de la tapa para permitir el paso del biogás hacia otro envase PET de 3,0 L y que contenía agua hasta tres cuartas partes de su capacidad. A la taparrosca de este último recipiente se le hicieron dos agujeros de 6 mm de diámetro, uno para el flujo de biogás que entraba por la parte superior del envase y por el segundo orificio se conectó otra manguera de 1/4 de pulgada, la cual partió desde el fondo del recipiente para desembocar en un tercer envase aforado. A través de esta segunda manguera salió el agua desalojada permitiendo así cuantificar periódicamente el biogás por desplazamiento del líquido.

Para asegurar el hermetismo de cada reactor se sellaron las uniones con pegante de silicona caliente. En la Figura 10 se presenta la fotografía de uno de los reactores construidos.

En vista de que la pulpa de café con la que se trabajó no contaba con tratamiento físico ni químico previo y con el fin de mejorar la reología de los reactores anaerobios, se decidió realizar cinco diluciones en diferentes porcentajes a cada uno de los mismos con sus respectivos testigos. Para ello se vertieron 500 mL de lodo activado en cada recipiente y antes de verter la pulpa de café, a cada uno se le adicionó la cantidad de agua natural que se muestra en la Tabla 4 y que se ilustra en la Figura 11. “La inoculación del reactor se realiza con el fin de suministrar la biomasa metanogénica, además de las condiciones de sustrato y nutrientes necesarias para su crecimiento, para que se inicien las reacciones bioquímicas de transformación del sustrato a metano” (Orozco, P., 2003, p.51). Esta autora

alimentó 350 L de inóculo en un reactor de 2.000 L, propuesto por Cenicafé en Colombia, por lo que guardando las proporciones para un reactor PFR de 400 L como el que se experimentó en esta investigación, se inocularon 70 L de lodo activado. De igual forma a los biodigestores de 3,0 L se les inocularon 500 mL de lodo activado.



Figura 10. Modelo de reactor anaeróbico discontinuo o por lotes, alimentado con lodo activado, agua y pulpa de café como sustrato, para la producción de biogás y su respectiva cuantificación por el método de desplazamiento de líquido.

Tabla 4. Agua y lodo activado adicionados a los biodigestores antes de verter la pulpa.

Número del reactor	Cantidad de lodo activado (mL)	Cantidad de agua adicionada (mL)
1 y 2	500	200
3 y 4	500	400
5 y 6	500	600
7 y 8	500	800
9 y 10	500	1000



Figura 11. Fotografía de los 10 envases en los que se adicionó agua y lodo activado en cinco diferentes diluciones antes de verter la pulpa de café.

Con base en las cantidades de lodo activado, agua y pulpa de café, adicionados en cada reactor, se elaboró la Tabla 5, la cual presenta dichos valores en mL con sus respectivos porcentajes.

Tabla 5. Dosificación de reactivos adicionados en cada reactor, con sus respectivos porcentajes.

No. reactor	Lodo activado		Agua		Pulpa de café	
	mL	%	mL	%	mL	%
1 y 2	500	20	200	8	1800	72
3 y 4	500	20	400	16	1600	64
5 y 6	500	20	600	24	1400	56
7 y 8	500	20	800	32	1200	48
9 y 10	500	20	1000	40	1000	40

Posteriormente se adicionó pulpa de café como sustrato hasta completar 2,5 L de volumen total en cada reactor, como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Fotografía de los 10 reactores con el sustrato de pulpa de café, lodo activado y agua, hasta completar volúmenes iguales de 2,5 L aproximadamente.

Paso seguido se homogenizó cada una de las mezclas mediante agitación y se dejaron en reposo durante unas 24 horas para proceder a medirles el pH, pues se ha encontrado que es “un rango entre 6.5-7.5 el que necesitan las bacterias metanogénicas para trabajar. Si el pH baja y se vuelve más ácido la acción de las bacterias metanogénicas puede inhibirse y, esto puede ocasionar el aumento de la proporción de gas carbónico en el biogás” (Botero, 1987, citado por Balseca y Cabrera, 2011, p. 5). Para dicha medición del pH se utilizó un pHmetro marca Pometer, referencia CE PH-009(I), Pen Type pH Meter, como el mostrado en la Figura 13.



Figura 13. Medición del pH de cada reactor.

Antes de cerrar herméticamente los reactores a nivel de laboratorio, se hizo la lectura de los respectivos pH. Pasadas 24 horas, con el fin de aumentar el pH de los reactores que presentaban los valores más bajos, se les añadió Hidróxido de Sodio hasta alcanzar valores cercanos a 7,0. Después de 24 horas se volvió a medir el pH a cada uno. Los datos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores de pH inicial y final medidos en cada reactor, así como cantidad de Hidróxido de Sodio (NaOH) adicionado.

Número del reactor	pH inicial	NaOH adicionado (g)	pH final
1	7,0	0	7,0
2	6,8	0	6,8
3	6,6	0	6,6
4	6,7	0	6,7
5	6,8	0	6,8
6	6,6	4,0	7,0
7	6,2	10,0	7,2
8	6,2	10,0	7,1
9	5,5	20,0	7,0
10	5,6	20,0	7,1

Seguidamente se procedió a cerrar herméticamente cada reactor anaerobio dando inicio a la producción de biogás. La Figura 14 muestra los reactores al momento de iniciar los ensayos y la Figura 15 después de 15 días.



Figura 14. Fotografía de los reactores al momento de iniciar las pruebas de laboratorio.



Figura 15. Fotografía de los reactores después de 15 días de ensayos.

5.3 Construcción de un digestor anaerobio tipo flujo pistón

Se construyó un digestor anaerobio tipo flujo pistón o reactor de flujo pistón –PFR por sus siglas en inglés de *Plug Flow Reactor*– de 400 L, con materiales reciclados y se instaló cerca de una finca productora de café del municipio de Fredonia.

El reactor construido consiste en un tanque dispuesto de forma longitudinal y que tiene tres orificios a través de uno de los cuales se ingresan los reactivos –lodo activado, agua y pulpa de café–, por otro sale el biogás y por el tercero el lodo estabilizado. Un diseño de reactor PFR utilizado en este trabajo se muestra en la Figura 16.

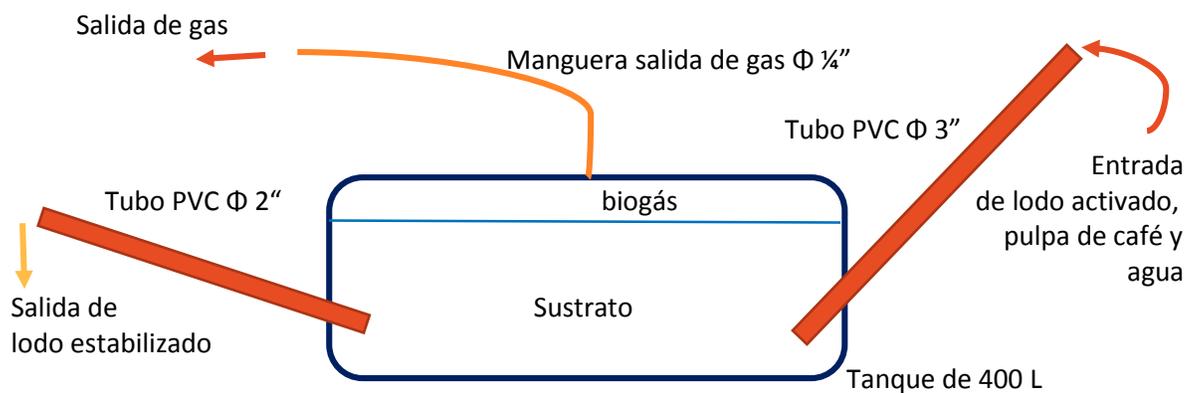


Figura 16. Representación gráfica de un reactor flujo pistón –PFR– de 400 L, para producción de biogás y lodo estabilizado.

El Reactor Flujo Pistón –PFR- se fabricó uniendo dos recipientes de polipropileno de alta densidad, de 200 L de capacidad cada uno, de acuerdo al modelo que se muestra en la Figura 17. En otro recipiente de 60 L, unido al primero mediante una manguera de $\text{Ø } \frac{1}{4}$ ", por donde circula el biogás, se vertieron 150 L de agua para ser desalojada y medida periódicamente en un tercer recipiente abierto y aforado. La Figura 18 muestra el reactor construido.



Figura 17. Proceso de fabricación de un tanque longitudinal de 400 L.



Figura 18. Reactor PFR de 400 L para producción de biogás con pulpa de café como sustrato. Por la derecha ingresa pulpa de café y agua; por la izquierda, en la parte inferior sale lodo estabilizado y por arriba biogás, el cual pasa a un tonel que contiene agua que es desalojada por la presión del biogás y recibida en un recipiente para su cuantificación.

5.4 Puesta a punto del proceso de digestión anaerobia empleando pulpa de café en un reactor flujo pistón para la producción de biogás

Con base en los resultados obtenidos en los ensayos preliminares se puso en funcionamiento el reactor PFR alimentándolo con agua, lodo activado y pulpa de café como sustrato. Pasadas 24 horas se midió el pH y se encontró un valor de 7,2. Luego de otras 24 horas se volvió a medir el pH y esta vez arrojó un resultado de 7,1 indicando que el pH se estabilizó en “un rango entre 6.5-7.5 que es el que necesitan las bacterias metanogénicas para trabajar” (Botero, 1987, citado por Balseca y Cabrera, 2011, p. 5).

La cuantificación del biogás producido en el PFR se hizo por el método de desplazamiento de líquido, descrito por Parajuli (2011), en el cual se tuvo en cuenta la cantidad de agua desalojada del sistema por efecto de la presión ejercida por el biogás sobre la superficie del agua y recolectada diariamente en el recipiente dispuesto a la salida de la misma. Para ello se utilizaron beakers aforados de 500 mL, 200 mL y 100 mL, según el volumen de agua desalojada y se registraron los datos.

5.5 Elaboración de un documento guía para caficultores y estudiantes

Se elaboró un documento que contiene estrategias para el aprovechamiento de la pulpa de café empleando la digestión anaerobia, allí se plasmaron los resultados de los objetivos 1 y 2. Se buscó que fuese de fácil comprensión y aplicación para caficultores y estudiantes de bachillerato.

Se inició con algunas generalidades acerca del proceso de beneficio del café y la problemática que se genera por la mala utilización o disposición de la pulpa. Luego se explicó cómo ocurre la digestión anaerobia de la materia orgánica, para pasar luego a describir la forma de cómo construir un reactor flujo pistón de 400 L de capacidad con materiales reciclables. Seguidamente se presentó un diagrama de reactor PFR y se hizo un listado de los materiales que se requirieron para su fabricación. También se relacionaron las cantidades de lodo activado, agua y pulpa de café necesarios para su funcionamiento. Se explicó paso a paso el proceso constructivo, se adjuntaron fotografías del mismo, y se remitió al link de un video explicativo sobre el tema, elaborado por el autor de esta investigación. Finalmente se propusieron algunas recomendaciones. Dicho documento se presenta en el Anexo 1.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1 Ensayos preliminares de las pruebas de laboratorio

Los ensayos preliminares a nivel de laboratorio se realizaron durante 100 días, tiempo durante el cual los reactores produjeron biogás en el proceso de digestión anaerobia, momento en el cual se procedió a medir el volumen de biogás producido por cada biodigestor. Diariamente se midió la cantidad de agua desalojada por el sistema durante los primeros 31 días, posteriormente se midió cada cinco días. Dicho volumen de agua es equivalente a la cantidad de biogás producido. Los datos se presentan en la Tabla 7.

Una vez finalizados los ensayos a nivel de laboratorio, se enviaron los recipientes que contenían el biogás a los laboratorios de química de la Universidad Pontificia Bolivariana de la ciudad de Medellín para la cuantificación del metano presente, dando como resultado que los reactores 5 y 6 fueron los de mayor cantidad de metano con valores del 62% de CH₄, 35% de CO₂ y 3% de otros compuestos. Los demás reactores presentaron contenidos de metano inferiores al 57%.

Es importante anotar que de acuerdo con Vera (1996, p.40), citado por Balseca y Cabrera (2011, p.4), en una muestra de biogás procedente de un biodigestor de características similares a los empleados en este trabajo, el contenido de metano se encuentra entre el 55% y el 65%, el dióxido de carbono entre el 34% y el 45% y pequeñas cantidades de nitrógeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno. Esto indica que el metano obtenido en estos ensayos está dentro del rango reportado por estos autores.

De acuerdo con los datos arrojados por los ensayos realizados a nivel de laboratorio, el par de reactores que produjo la mayor cantidad de biogás durante los 100 días que duraron los ensayos fue la de los números 9 y 10, con un total de 4750 mL, los cuales de acuerdo con la Tabla 2, contenían 20% de lodo activado, 40% de agua y 40% de pulpa de café; lo que indica que produjeron 10,73 L de biogás por Kg de pulpa. Por su parte, los reactores 5 y 6 fueron la segunda pareja que más biogás produjo, con un 20% de lodo activado, 24% de agua y 56% de pulpa de café, produciendo en promedio 4150 mL de biogás; es decir, 3,2 L de biogás por litro de pulpa de café, equivalente a 7,23 L de biogás por Kg de pulpa. Esto indica que en comparación con los reactores 9 y 10 hubo una mayor cantidad de pulpa procesada con menor consumo de agua. La Figura 19 muestra la tendencia de la producción de gas en cada reactor.

Tabla 7. Producción diaria de biogás (mL) en los biodigestores a nivel de laboratorio.

Día	Temp. (°C)	Número del reactor / Volumen de biogás producido (mL)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	27	550	480	0	0	400	420	550	0	390	80
2	25	100	290	0	0	180	100	50	0	0	370
3	24	100	130	0	0	120	80	0	0	0	410
4	22	0	100	0	0	0	0	0	0	40	0
5	26	100	20	50	310	90	0	0	110	0	0
6	22	50	180	130	80	0	0	0	40	0	0
7	21	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
8	22	50	130	0	0	0	0	0	0	0	0
9	25	100	130	0	90	110	0	80	50	110	150
10	24	50	120	0	30	100	70	100	20	60	90
11	26	80	80	0	0	100	90	0	60	80	0
12	25	40	100	40	120	100	150	80	30	120	100
13	19	0	20	0	0	0	40	0	0	0	0
14	24	100	100	110	0	100	70	60	50	50	0
15	24	80	40	0	40	90	150	140	120	90	40
16	27	100	70	40	120	120	100	80	90	120	110
17	26	70	0	0	80	60	70	90	100	80	90
18	27	80	50	0	60	100	80	90	0	90	70
19	25	60	30	0	120	50	90	70	80	70	110
20	24	50	60	50	0	40	70	90	90	60	20
21	23	90	20	40	60	120	40	50	70	110	80
22	22	80	0	0	80	80	90	80	100	70	90
23	23	100	70	0	110	110	120	140	150	120	100
24	22	50	0	40	40	60	10	20	40	60	50
25	24	50	20	0	40	50	10	10	30	80	40
26	21	60	50	0	50	40	100	90	110	80	0
27	21	50	20	0	40	70	70	80	100	70	40
28	25	70	30	0	80	90	80	90	110	90	70
29	27	60	40	0	50	70	70	60	90	90	50
30	24	50	0	0	50	60	20	40	80	60	30
31	22	60	30	20	40	60	40	40	90	70	30
32	23	80	30	8	68	75	38	40	78	88	55
33	24	80	30	7	67	75	37	40	77	87	55
34	23	80	30	8	68	75	37	40	78	88	55
35	22	80	30	7	67	75	37	40	77	87	55
36	23	60	8	4	52	64	16	18	38	68	46
37	23	60	8	4	52	64	16	18	38	68	46
38	24	60	8	4	52	64	16	18	38	68	46
39	22	60	8	4	52	64	16	18	38	68	46
40	23	60	8	4	52	64	16	18	38	68	46
41	19	52	10	2	46	54	14	12	36	64	36
42	20	52	10	2	46	54	14	12	36	64	36
43	20	52	10	2	46	54	14	12	36	64	36
44	19	52	10	2	46	54	14	12	36	64	36
45	19	52	10	2	46	54	14	12	36	64	36
46	25	50	2	0	44	52	4	2	14	56	38
47	24	50	2	0	44	52	4	2	14	56	38
48	23	50	2	0	44	52	4	2	14	56	38
49	25	50	2	0	44	52	4	2	14	56	38

Día	Temp. (°C)	Número del reactor / Volumen de biogás producido (mL)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
50	25	50	2	0	44	52	4	2	14	56	38
51	24	44	2	0	42	36	12	14	20	46	24
52	22	44	2	0	42	36	12	14	20	46	24
53	21	44	2	0	42	36	12	14	20	46	24
54	21	44	2	0	42	36	12	14	20	46	24
55	22	44	2	0	42	36	12	14	20	46	24
56	21	46	2	0	42	48	12	8	16	50	30
57	22	46	2	0	42	48	12	8	16	50	30
58	24	46	2	0	42	48	12	8	16	50	30
59	24	46	2	0	42	48	12	8	16	50	30
60	23	46	2	0	42	48	12	8	16	50	30
61	24	48	2	0	48	46	8	4	10	54	40
62	26	48	2	0	48	46	8	4	10	54	40
63	25	48	2	0	48	46	8	4	10	54	40
64	26	48	2	0	48	46	8	4	10	54	40
65	26	48	2	0	48	46	8	4	10	54	40
66	25	42	4	0	42	36	12	10	12	48	26
67	24	42	4	0	42	36	12	10	12	48	26
68	26	42	4	0	42	36	12	10	12	48	26
69	25	42	4	0	42	36	12	10	12	48	26
70	25	42	4	0	42	36	12	10	12	48	26
71	23	46	4	0	36	50	10	12	20	48	24
72	20	46	4	0	36	50	10	12	20	48	24
73	19	46	4	0	36	50	10	12	20	48	24
74	20	46	4	0	36	50	10	12	20	48	24
75	20	46	4	0	36	50	10	12	20	48	24
76	23	42	4	0	32	40	16	12	18	50	18
77	22	42	4	0	32	40	16	12	18	50	18
78	25	42	4	0	32	40	16	12	18	50	18
79	26	42	4	0	32	40	16	12	18	50	18
80	25	42	4	0	32	40	16	12	18	50	18
81	25	28	2	0	20	30	6	2	10	42	16
82	20	28	2	0	20	30	6	2	10	42	16
83	19	28	2	0	20	30	6	2	10	42	16
84	20	28	2	0	20	30	6	2	10	42	16
85	20	28	2	0	20	30	6	2	10	42	16
86	23	20	0	0	16	18	4	4	8	26	10
87	23	20	0	0	16	18	4	4	8	26	10
88	24	20	0	0	16	18	4	4	8	26	10
89	22	20	0	0	16	18	4	4	8	26	10
90	23	20	0	0	16	18	4	4	8	26	10
91	21	14	0	0	12	12	0	0	12	16	4
92	19	14	0	0	12	12	0	0	12	16	4
93	19	14	0	0	12	12	0	0	12	16	4
94	20	14	0	0	12	12	0	0	12	16	4
95	20	14	0	0	12	12	0	0	12	16	4
96	19	8	0	0	6	10	0	0	8	10	0
97	18	8	0	0	6	10	0	0	8	10	0
98	18	8	0	0	6	10	0	0	8	10	0
99	19	8	0	0	6	10	0	0	8	10	0

Día	Temp. (°C)	Número del reactor / Volumen de biogás producido (mL)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100	18	8	0	0	6	10	0	0	8	10	0
Total		5300	2750	580	4150	5350	2950	2830	3230	5500	4000
Prom.	23,4	4025		2365		4150		3030		4750	

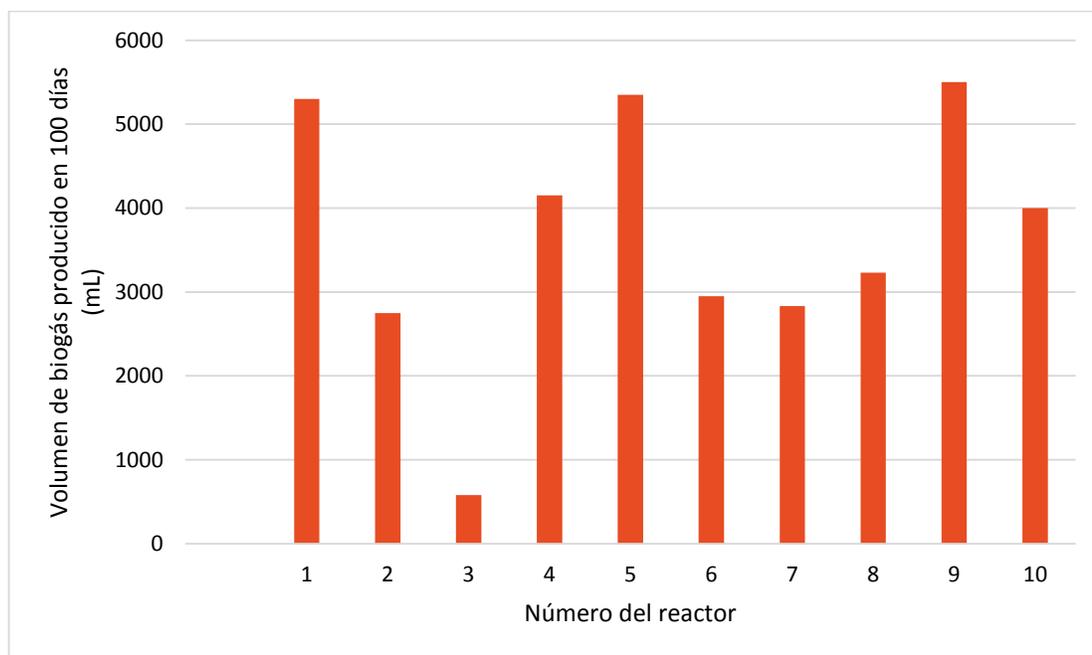


Figura 19. Producción de biogás en 100 días de ensayo por cada reactor.

La producción de biogás en el reactor 3 es inconsistente con la de los demás reactores y teniendo en cuenta que se dosificó igual que el reactor 4 se concluye que éste se descompuso, por lo tanto la pareja de reactores 3 y 4 se eliminó del ensayo.

Los reactores 1 y 2 fueron la tercera pareja de mayor producción de biogás, con un promedio de 4025 mL, procedentes de un 20% de lodo activado, 8% de agua y 72% de pulpa de café; es decir, 2,2 L de biogás por litro de pulpa de café, equivalente a 4,97 L de biogás por Kg de pulpa. Esta pareja fue la que más pulpa procesó, sin embargo esta relación contiene poca agua y por lo tanto el sustrato es muy seco, situación que afecta la reología del sistema impidiendo el movimiento de dicho sustrato. La Figura 20 muestra la tendencia de producción de gas por cada par de reactores.

La pareja de reactores 7 y 8 fue la cuarta en producción de biogás, con un total de 3030 mL, procedentes de 20% de lodo activado, 32% de agua y 48% de pulpa de café; es decir, 2,5 L de biogás por litro de pulpa de café, equivalente a 5,65 L de biogás por Kg de pulpa. Esto indica que comparado con los reactores 5 y 6 produce menos biogás, consume más agua y procesa menos pulpa de café.

Después de analizar los resultados de los ensayos, se determinó que los reactores 5 y 6 serían los modelos a utilizar para el reactor PFR, puesto que aunque fue la segunda pareja de mayor producción de biogás, después de los reactores 9 y 10, fueron los que presentaron mayor contenido de metano y degradaron mayor cantidad de pulpa con menor consumo de agua. Además, comparándolos con los reactores 1 y 2, los reactores 5 y 6 emplearon mayor cantidad de agua, lo cual favorece la reología del sustrato dentro del biodigestor; es decir, los reactores 1 y 2 funcionaron en condiciones muy secas, lo cual es inconveniente para el funcionamiento de un reactor flujo pistón como el construido para esta investigación.

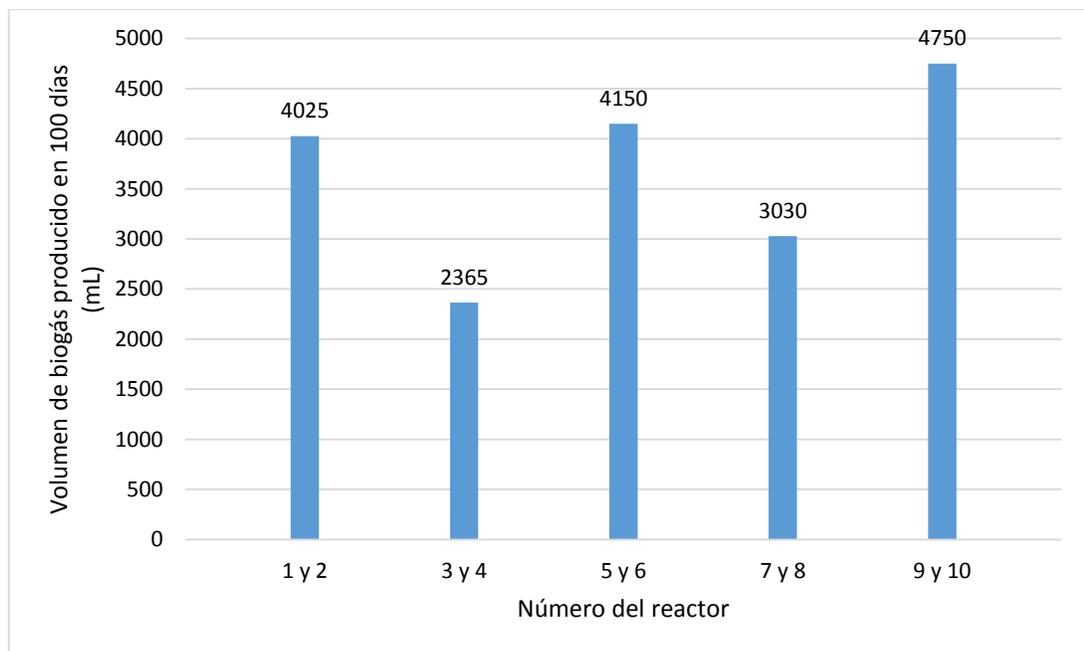


Figura 20. Producción de biogás por cada par de reactores en 100 días de ensayo.

En cuanto al tiempo de retención de los microorganismos dentro de los biodigestores se estima en 85 días, pues aunque hubo producción de biogás durante 100 días, en los primeros 11 días fue muy irregular y en los últimos 4 disminuyó notoriamente.

La temperatura ambiente en el sitio donde se hicieron los ensayos de laboratorio osciló entre 18°C y 27°C, aunque sólo en tres ocasiones bajó de los 20°C y en cuatro ocasiones

llegó a 27°C; el promedio para los 100 días de experimentación fue de 23,4°C. Es de anotar que la temperatura ambiente se midió siempre a la misma hora para tener datos representativos; además los biodigestores se encontraban ubicados en un sitio con poca ventilación y protegidos de la radiación solar por tejas plásticas translúcidas; o sea que el sitio superaba en 3,4°C la temperatura promedio de Fredonia que es de 20°C, según datos del Departamento Nacional de Estadística –DANE– (2005).

En un trabajo similar a éste, en el que se produjo biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café, los autores afirman que “la temperatura interna de cada biodigestor es mayor que la temperatura ambiente generado por la interacción de las bacterias, la transmisión calorífica y la transmisión de fluidos que afectan directamente al biodigestor elevando su temperatura a sus rangos metanogénicos” (Williams y Tamminga, 1995, citados por Balseca y Cabrera, 2011). Además reportaron que al comparar la producción de biogás con la temperatura ambiente máxima y mínima, se observó que estas variables tuvieron un impacto en la producción de biogás.

Otras investigaciones y aplicaciones relacionadas con la digestión anaerobia reportan que “El efecto de la temperatura no sólo incide en el aspecto cinético (velocidad de consumo del sustrato, velocidad de crecimiento de biomasa) sino también en el aspecto termodiámico (conversión de sustrato a producto referente a las condiciones de equilibrio que se pueden lograr para una etapa determinada de la digestión anaerobia” (Rosenkranz, 2013, p. 51).

En las Figuras 21, 22, 23 y 24 se muestra la producción de biogás en los biodigestores 1, 4, 6 y 9 respectivamente.

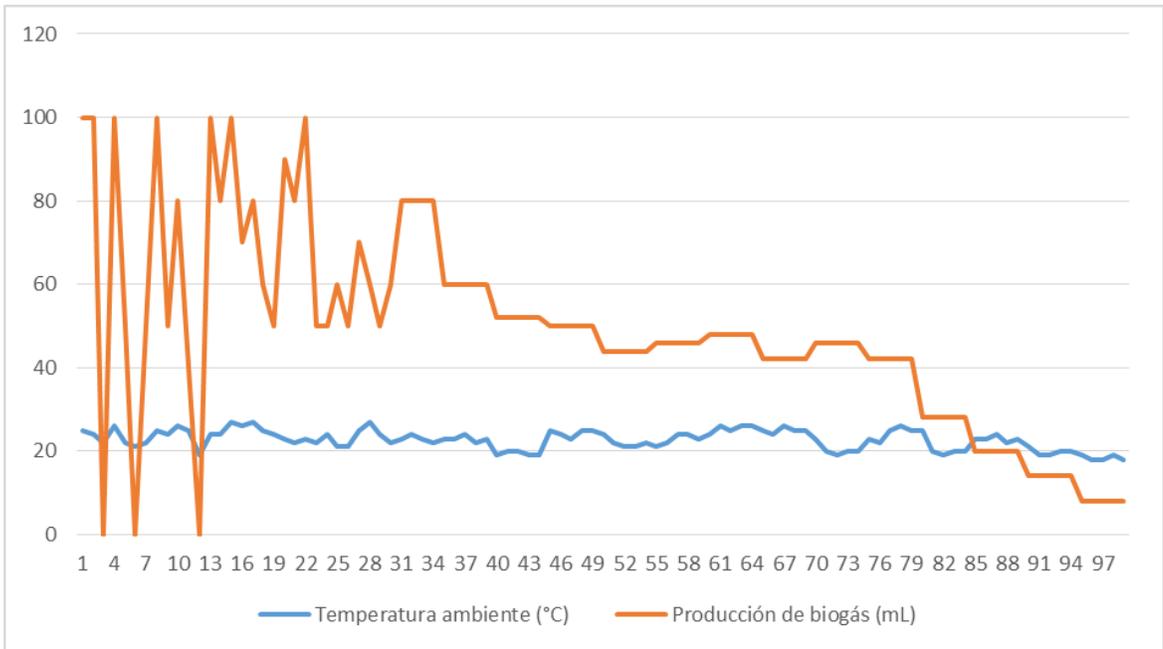


Figura 21. Producción de biogás en el biodigestor 1.

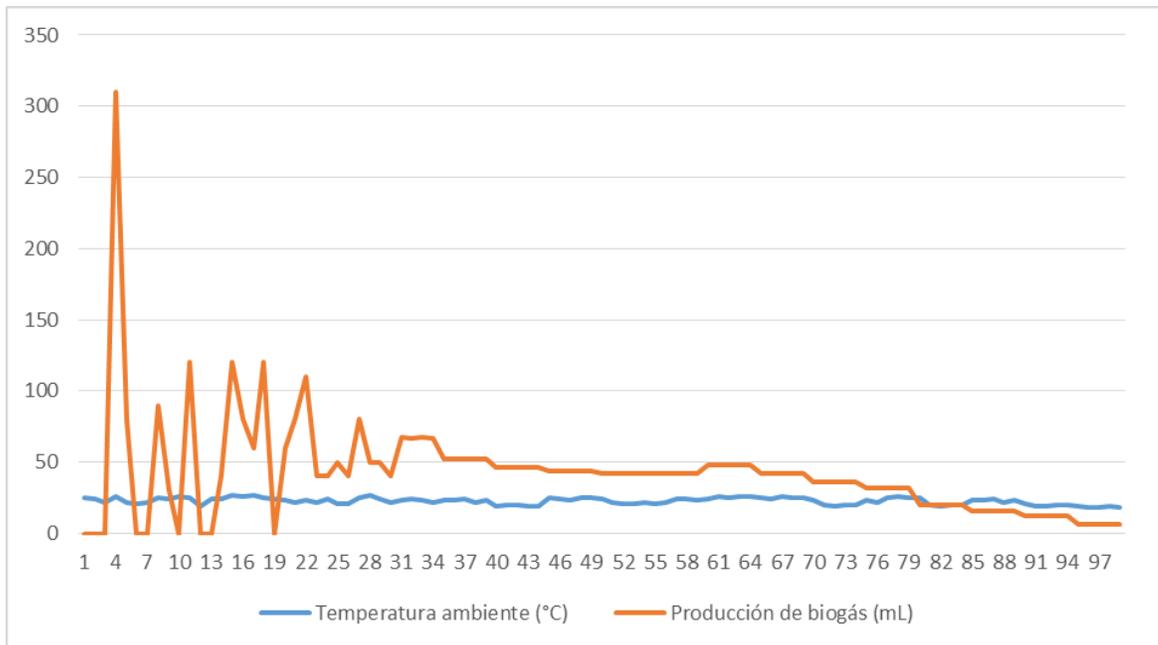


Figura 22. Producción de biogás en el biodigestor 4.

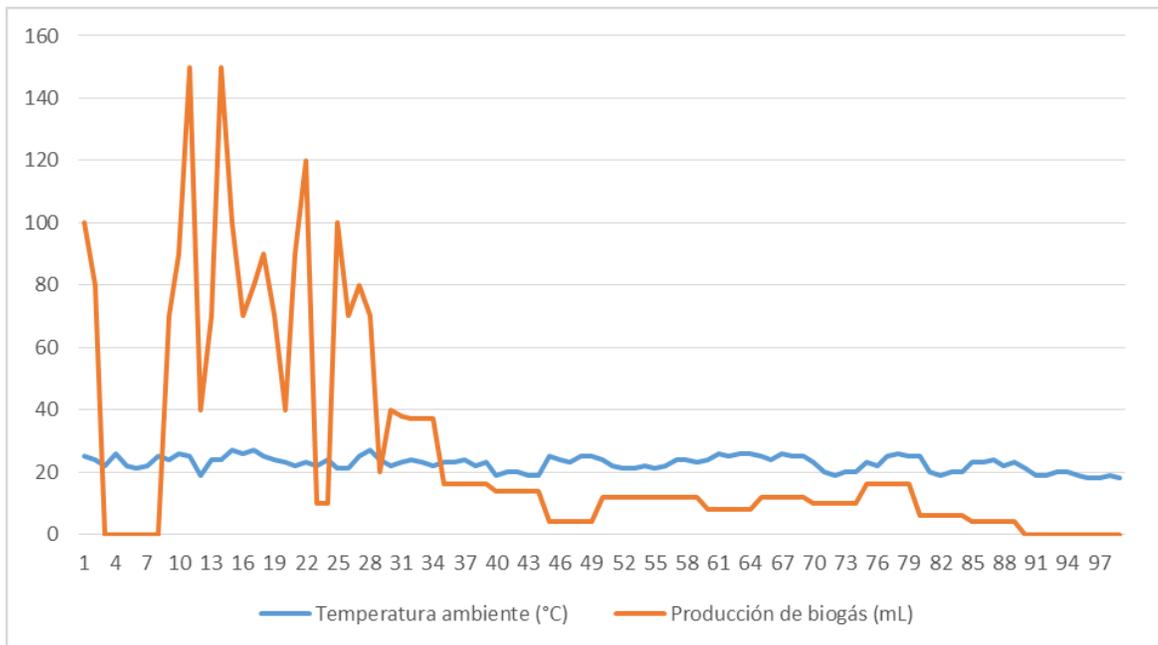


Figura 23. Producción de biogás en el biodigestor 6.

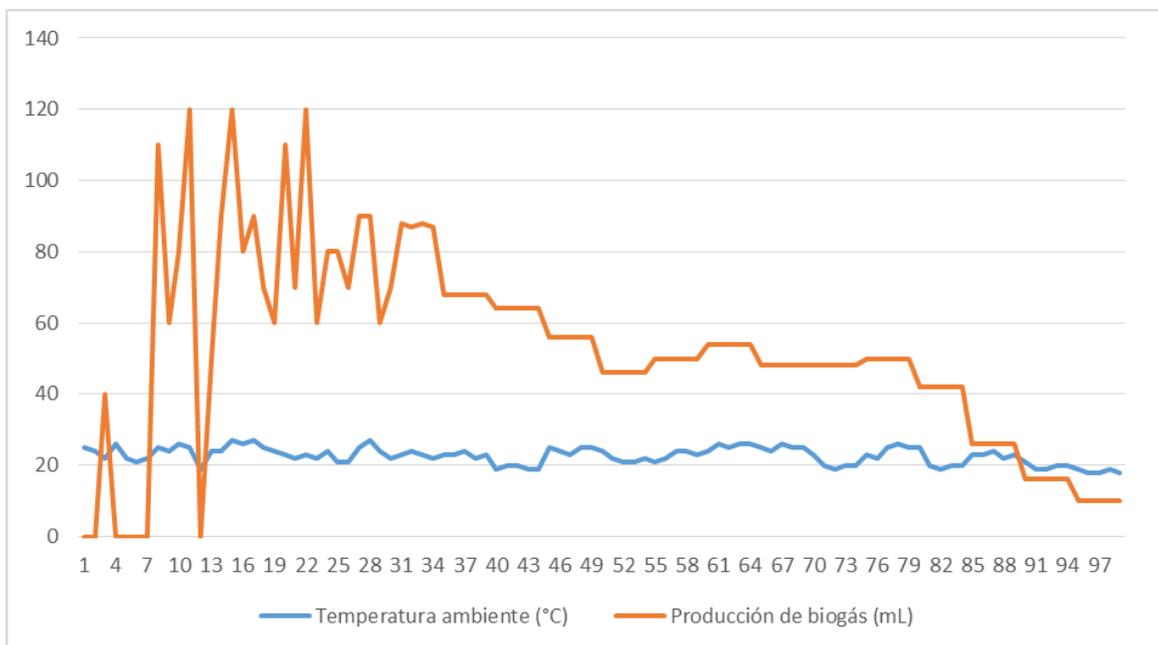


Figura 24. Producción de biogás en el biodigestor 9.

6.2 Producción de biogás en un reactor flujo pistón PFR de 400 L

De acuerdo con los datos arrojados en las pruebas de laboratorio, se adoptó como modelo para producir biogás el conformado por la pareja de reactores 5 y 6, debido a que fue la que mayor contenido de metano presentó, por lo que el sustrato inicial con el que se alimentó el PFR de 400 L se dosificó en las mismas proporciones, así: 350 L de sustrato conformados en un 20% de lodo activado (70 L), 24% de agua (84 L) y 56% de pulpa de café (196 L) y los 50 L restantes de capacidad del PFR se dejaron para el almacenamiento del biogás generado.

Luego de homogenizar la mezcla mediante agitación se midió el pH, el cual arrojó un valor de 7,2, dicho pH se encontró dentro del rango de 6,5-7,5 propuesto por Botero (1987), citado por Balseca y Cabrera (2011, p. 5) para el funcionamiento del sistema; por lo tanto se dio inicio a la toma de datos de producción de biogás y lodo estabilizado. Cabe anotar que el reactor se ubicó cerca de la vivienda, en un sitio protegido de la humedad y de cambios bruscos de temperatura en el ambiente.

Para mantener el PFR en funcionamiento se calculó la dosis diaria de pulpa de café y agua con que se alimentó el sistema; es importante aclarar que no se tuvo en cuenta el lodo activado en dicha dosis diaria puesto que este lodo sólo se ingresó una vez al reactor para el arranque del mismo.

Para proceder con los cálculos se empezó por encontrar la dosis diaria de sustrato que se debería haber introducido en cada reactor utilizado a nivel de laboratorio, si éstos se hubieran alimentado diariamente; para ello se debe tener en cuenta que el tiempo de retención, durante el cual hubo producción de biogás, fue de 85 días, pues aunque se tomaron datos durante 100 días, en los primeros 11 días la producción de biogás fue muy irregular en algunos de ellos y en los últimos 4 días la producción disminuyó notoriamente. De ahí que se decidió operar el PFR durante 30 días, pues es un tiempo bastante menor durante el cual era de esperarse que hubiera producción de biogás.

Se utilizó entonces la Ecuación 1, así:

$$Dosis\ de\ sustrato = \frac{Volúmen\ de\ pulpa + Volúmen\ de\ agua}{Tiempo\ de\ retención\ hidráulica} \quad (1)$$

$$Dosis\ de\ sustrato = \frac{2,0\ L}{85\ días} = 0,024\ L/día$$

Puesto que en los ensayos de laboratorio, para reactores de 2,0 L de sustrato, el valor fue de 0,024 L/día, para el reactor PFR cuya cantidad de agua más pulpa es de 280 L, la cantidad de alimento diario se halló mediante la ecuación 2:

$$\frac{X \text{ L/día}}{280 \text{ L}} = \frac{0,024 \text{ L/día}}{2,0 \text{ L}} \quad (2)$$

Despejando,

$$X \frac{\text{L}}{\text{día}} = \frac{0,024 \frac{\text{L}}{\text{día}} \times 280 \text{ L}}{2,0 \text{ L}} = 3,36 \text{ L/día}$$

Esto indica que diariamente se debía alimentar el PFR con 3,36 L de sustrato -pulpa de café y agua. De otra parte, puesto que los porcentajes de reactivos en los reactores 5 y 6 fueron de 20% de lodo activado, 24% de agua y 56% de pulpa de café, en términos de proporciones en números enteros las relaciones por partes entre cada reactivo es de 5:6:14 respectivamente. De ahí que 6 partes de agua sumadas con 14 partes de pulpa conforman 20 partes del total de la dosis, por lo tanto cada parte se calcula así:

$$1 \text{ parte} = \frac{3,36 \text{ L/día}}{20 \text{ partes}} = 0,168 \text{ L} \quad (3)$$

Donde la dosis diaria de agua es:

$$0,168 \text{ L} \times 6 \text{ partes de agua} = 1,008 \text{ L de agua}$$

Por otro lado, la dosis diaria de pulpa de café es:

$$0,168 \text{ L} \times 14 \text{ partes de pulpa de café} = 2,352 \text{ L de pulpa de café}$$

Por aproximación la dosis diaria para alimentar el PFR es de 1,0 L de agua y 2,4 L de pulpa de café. Pero teniendo en cuenta que la densidad de la pulpa es de 0,4425 Kg/L, se tiene que la dosis diaria también se puede reportar como 1,0 L de agua y 1,06 Kg de pulpa de café.

La Tabla 8 muestra los datos obtenidos diariamente durante 30 días de funcionamiento. En ella se puede observar que la producción de biogás durante los 30 días fue de 370,8 L; es decir, 111,2 L/día en promedio. Además teniendo en cuenta que la cantidad inicial de pulpa alimentada al PFR fue de 196 L y diariamente se le adicionaron 2,4 L durante 30 días, o sea 72 L, se encuentra que se procesaron durante todo el ensayo un total de 268 L de pulpa, lo que equivale a 8,93 L/día de pulpa procesada. Estos datos permiten calcular el rendimiento, el cual fue de 41,52 L de biogás por L de pulpa de café o también 93,83 L de biogás por Kg de pulpa, teniendo en cuenta que la densidad de la pulpa utilizada es de 0,4425 Kg/L.

Tabla 8. Temperatura ambiental, producción de biogás y lodo estabilizado en el PFR.

Día	Temperatura ambiente	Biogás producido (L)	Lodo estabilizado producido (L)
1	22	56,1	0
2	21	25,2	1,2
3	21	11,2	1,4
4	23	2,8	1,0
5	21	12,6	1,8
6	22	3,2	1,0
7	19	0	1,1
8	20	0	1,4
9	23	14	0,6
10	25	16,8	0,8
11	20	14,6	1,0
12	24	0	1,5
13	21	15,3	1,3
14	23	12,6	1,7
15	22	16,8	1,2
16	20	9,5	1,2
17	25	16,8	1,3
18	24	7,0	0,7
19	25	6,4	1,1
20	27	17,8	1,0
21	24	12,4	1,2
22	21	17,8	1,1
23	19	9,6	1,6
24	20	5,2	1,9
25	21	12,8	1,8
26	22	14,0	1,4
27	23	10,9	1,0
28	23	8,9	0,8
29	22	7,9	1,4
30	20	12,6	1,6
Total	22,1	370,8	36,1

En la Tabla 8 puede observarse que se produjeron 36,1 L de lodo estabilizado durante los 30 días de ensayo; o sea, 1,2 L/día en promedio. Y como se procesó un promedio de 80,4 L de pulpa de café, se tiene un rendimiento de 0,015 L de lodo estabilizado por L de pulpa de café, o lo que es lo mismo 0,034 L de lodo por Kg de pulpa.

Una muestra del biogás producido se envió a los laboratorios de química de la Universidad Pontificia Bolivariana de la ciudad de Medellín para cuantificar el metano presente, arrojando un valor del 61% de CH₄, 36% de CO₂ y 3% de otros compuestos. Este dato es consistente con los porcentajes hallados en los ensayos preliminares que fue del 62% de CH₄, 35% de CO₂ y 3% de otros compuestos.

Finalmente se midió el pH y se encontró un valor de 6,74, lo que indica que el pH todavía se encontraba dentro del rango de supervivencia de las bacterias metanogénicas. La Figura 25 muestra cómo fue la producción de biogás durante los 30 días de ensayo.

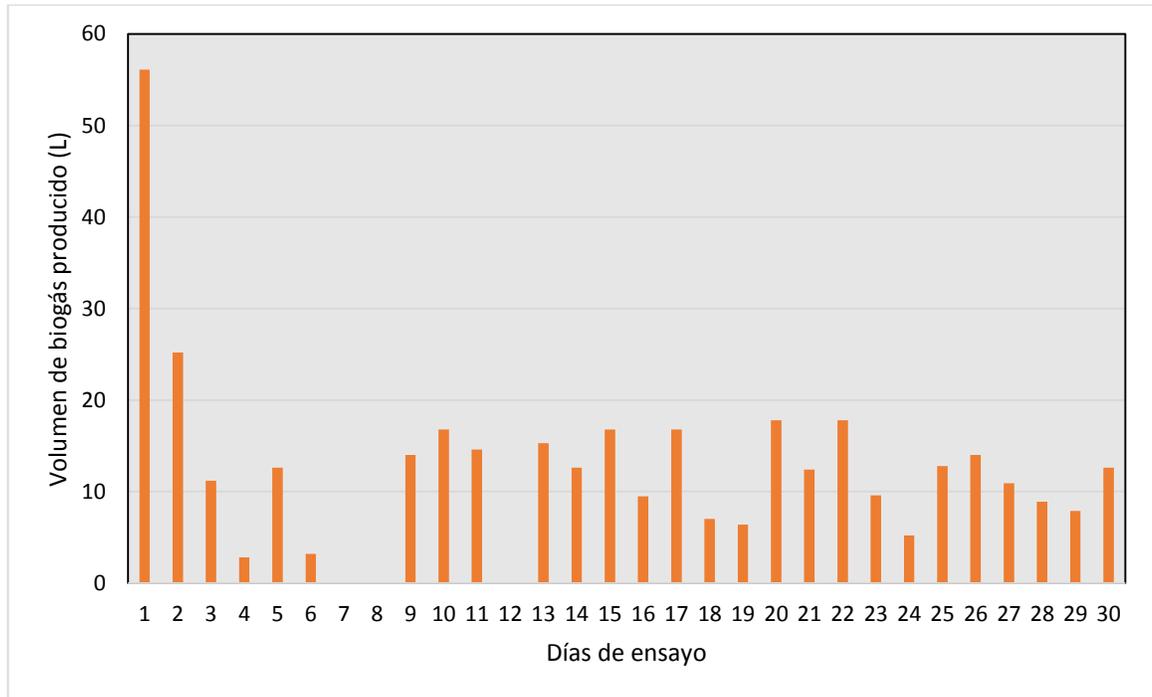


Figura 25. Cantidad de biogás producido durante 30 días de prueba.

Según Balseca y Cabrera (2011), en ensayos similares obtuvieron 128 L de biogás por kilogramo de pulpa de café. A su vez, Calle y Arcila (1974) citados por Rosa, R. (2015), reportan rendimientos de 25 L de biogás por kilogramo de pulpa fresca alimentada a los digestores. Lorenzo y Obaya (2005) afirman que la cantidad de gas producido es muy variable, aunque generalmente oscila alrededor de los 350 L/Kg de sólidos degradables. Estos datos muestran una notable diferencia entre ellos. En la presente investigación el rendimiento fue de 93,83 L de biogás por Kg de pulpa, acercándose más a los resultados de Balseca y Cabrera (2011).

Con relación a la temperatura en el ambiente registrada durante los 30 días de ensayo, se puede observar en la Figura 26 que, al igual que en las pruebas de laboratorio, no existe una relación directa entre esta variable y la producción de biogás, al parecer por la poca variabilidad en el rango en el cual se movió; sin embargo, como se mencionó antes, estudios demuestran que la temperatura ambiental incide en la temperatura dentro del biodigestor afectando la producción de biogás.

El biogás obtenido no se utilizó para ningún proceso casero ni industrial, pues es necesario hacer montajes más sofisticados como filtración y purificación para utilizarlo en la cocina, o montajes aún más especializados para convertirlo en energía eléctrica. Sin embargo, es posible emplearlo, por ejemplo, para calentamiento de agua o en sistemas que ayuden al secado del café.

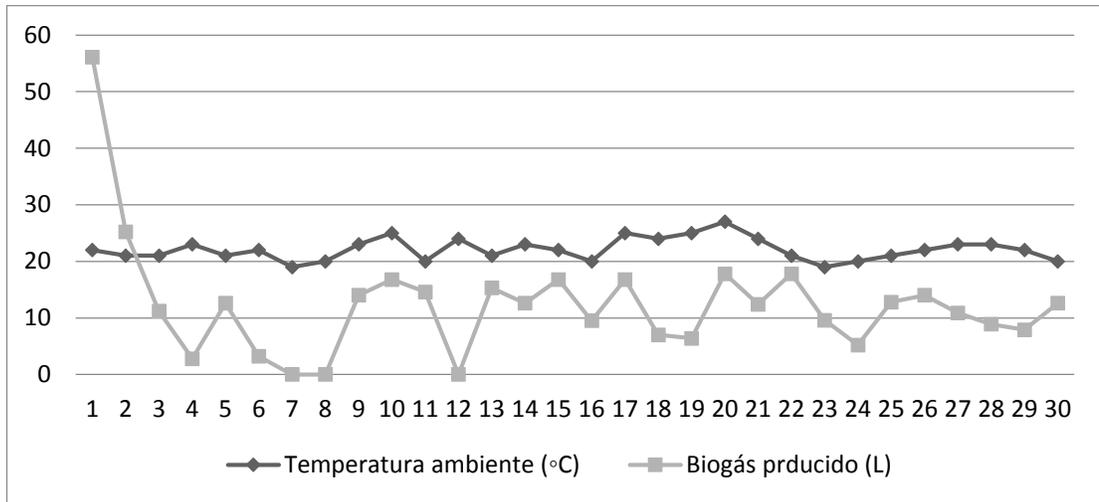


Figura 26. Producción de biogás en un PFR de 400 L.

En la Figura 27 se puede observar la producción de lodo activado. La eficiencia del lodo estabilizado como biofertilizante es tema de nuevas investigaciones, pues requiere tiempo y esfuerzo que no se contempló en este trabajo, sin embargo la experiencia de muchos investigadores dan fe de que este lodo es excelente mejorador de suelos.

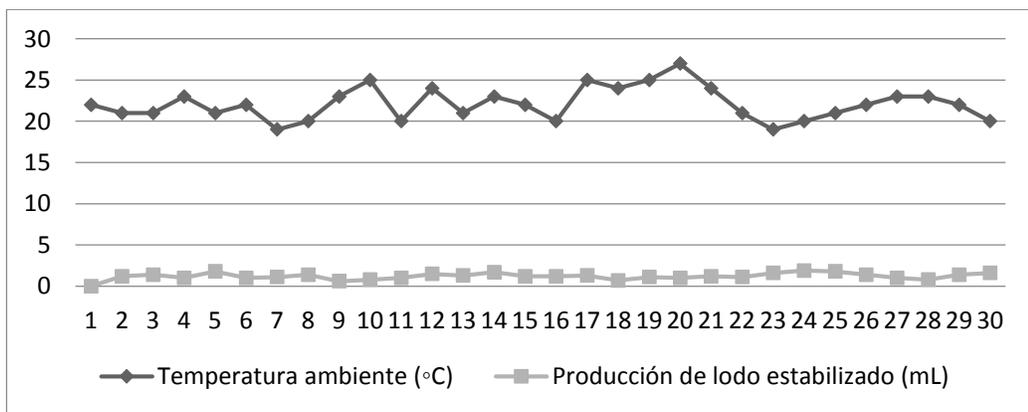


Figura 27. Producción de lodo estabilizado en un PFR de 400 L.

7. CONCLUSIONES

En los ensayos de laboratorio la pareja conformada por los reactores 5 y 6 fue la segunda de mayor producción de biogás, pero la de mayor producción de metano, por lo que se presentó como el mejor modelo a seguir para operar el PFR construido.

El tiempo de retención hidráulico para el sistema implementado a nivel de laboratorio fue de 85 días, tiempo durante el cual hubo producción de biogás, pues aunque se tomaron datos durante 100 días, en los primeros 11 días la producción de biogás fue muy irregular en algunos de los reactores y en los últimos 4 días la producción disminuyó notoriamente.

La digestión anaerobia en un reactor tipo PFR de 400 L de capacidad empleando 70 L de lodo activado y 196 L de pulpa de café como sustrato inicial, alimentando diariamente 2,4 L de pulpa de café y 1,0 L de agua, produjo en 30 días de operación 370,8 L de biogás a una concentración media de 61% de metano.

El rendimiento del proceso en el PFR fue de 41,52 L de biogás por L de pulpa de café alimentada al reactor, equivalente a 93,83 L de biogás por Kg de pulpa.

El reactor PFR utilizado en este proyecto fue de bajo costo por tratarse de materiales reciclados, de fácil adquisición y con poca sofisticación en su diseño.

Los resultados arrojados por este trabajo muestran que la producción de biogás es una de las muchas alternativas que se pueden implementar para aprovechar la pulpa de café, pero queda mucho camino por recorrer, pues las cantidades de residuos resultantes son alarmantes y su disposición final sigue dependiendo de la voluntad y decisión de los caficultores.

8. RECOMENDACIONES

Aunque el reactor PFR de 400 L fabricado artesanalmente como parte de esta investigación tuvo un buen desempeño, es recomendable tratar de conseguir tanques de una sola unidad, sin uniones ni empates, con el fin de evitar fugas de líquidos y gases, pues de ello depende el buen funcionamiento de los mismos. Además, si se desea implementar sistemas de mayor capacidad es preferible hacerlos con materiales más resistentes y de fabricación industrial.

Con esta investigación se pudo comprobar que los lodos activados procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales son recomendables para la puesta en marcha de reactores anaerobios.

El biogás generado mediante el aprovechamiento de pulpa de café en un reactor PFR, debe ser purificado para convertirlo en energía aprovechable. No obstante se puede utilizar en situaciones menos riesgosas para los equipos como en el calentamiento de alimentos, calentamiento de agua o sistemas de secado de café. De todas formas, siempre se debe tener en cuenta que el gas metano (CH_4) es explosivo y combustible, por lo tanto se debe contar con expertos en el tema para realizar montajes e instalaciones seguras, optimizando además su utilización.

El lodo estabilizado de esta manera también requiere de algunas pruebas y ensayos para determinar su calidad y sobre todo su inocuidad para los cultivos, animales y para el medio ambiente. Por lo tanto es recomendable contar con asesoría técnica especializada para hacer buen uso de este recurso.

BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Nacional del Café –ANACAFÉ- (2015). Los subproductos del café. Guatemala. Tomado de: https://www.anacafe.org/glifos/index.php/BeneficioHumedo_Subproductos.
- Balseca, D. y Cabrera, J. (2010). Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café. Zamorano, Honduras. 20 p.
- Bote, P. (2013). Estudio de los efectos del pH extremo por adición de NaOH sobre la producción y calidad del biogás y otros parámetros de la digestión anaerobia urbana. Alicante-España: Depuración de Aguas del Mediterráneo S.L. 101 p.
- Café de Colombia. (2015). FNC ayuda a mejorar ingreso de caficultores y mantiene altos estándares de exportación. Tomado de: http://www.cafedecolombia.com/ci-fnc-es/index.php/comments/fnc_ayuda_a_mejorar_ingreso_de_caficultores_y_mantiene_altos_estandares_de/.
- Castillo, R., Carballo, L. y Pérez, N. (2008). Usos de la pulpa de café. Cuba: Pinar del Río.
- Corona, I. (2007). Biodigestores. España: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE- (2005). Resultados y proyecciones (2005-2020) del censo 2005. Colombia.
- FAO Organización para la Alimentación y la Agricultura. 2010. Estadísticas FAO Organización de las Naciones Unidas: Perspectivas a plazo medio de los productos básicos agrícolas. 48 p.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2016). Algrano – Noticias e información que lo acercan al mundo cafetero. Tomado de: https://www.federaciondecafeteros.org/.../colombia_cerro_2015_con_cosecha_cafetera_record_en_ultimos_23_años
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2016). Café Paisa. Tomado de: http://www.cafepaisa.org/index.php?searchword=producci%C3%B3n+de+caf%C3%A9+Fr+edonia&ordering=&searchphrase=all&Itemid=27&option=com_search.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2014). Café de Colombia: Descubre lo que hay detrás del café de Colombia. Bogotá. 42 p.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2010). Café de Colombia: Café y medio ambiente. Tomado de: www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/mucho_mas_que_una_bebida/cafe_y_medio_ambiente/

- Franco, Z. (2017). Producción de pectinasas a partir de pulpa de café. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana. 62 p.
- Girón, L. (2008). Desarrollarán producción de energía eléctrica a partir de residuos agroindustriales. Comunica. 1 p.
- Houbron, E., Cano, V., Reyes, L. y Rustrian, E. (2007). En busca de una solución sustentable para el tratamiento de los desechos del café. México: Universidad Veracruzana.
- IDAE – Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. (2014). Biomasa. Digestores anaerobios. España: Besel S.A., 43 p.
- Jaramillo, J. (2016). Fredonia, datos cafeteros generales. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Medellín: Comité Departamental de Cafeteros de Antioquia. Tomado de: <http://cafepaisa.org/images/Secciones/ComiteEnAccion/112016/c5/fredonia.pdf>.
- Londoño, C. (2016). Fredonia Histórica. No. 65. Centro de Historia de Fredonia. 78 p.
- López, A. (2012). Valorización del estiércol de cerdo a través de la producción de biogás. Colombia: Fondo Nacional de la Porcicultura. 35 p.
- Lorenzo, Y. y Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Cuba: Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. 48 p.
- Medina, R. Avances en el tratamiento de aguas residuales domésticas a temperaturas sub-óptimas (aplicación en países andinos) en el biorreactor anaerobio de flujo pistón ascendente “rap-100”. Bolivia: Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Tomado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01026e03.pdf>.
- Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (2002). Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales – Guía. Bogotá. 64 p.
- Montoya, A. (2014). Generar energía eléctrica con pulpa de café, un propósito del T de A y Corantioquia. Medellín.
- Municipio de Fredonia. (2009). Plan Educativo Municipal 2009-2019: Fredonia incluyente y educador. 78 p.
- Orozco, P. (2003). Arranque y puesta en marcha de un reactor metanogénico tipo UAF para el tratamiento de las aguas residuales del lavado del café. (Tesis de ingeniería). Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Palacio, F. (2007). Estudio de la prefactibilidad de generar energía eléctrica utilizando como fuente primaria la pulpa del café que se produce en la región de Cajamarca para satisfacer las necesidades de una finca que consume 1 MWh por mes. (Tesis de ingeniería inédita). Universidad de La Salle, Bogotá.

Palau, C. (2016). Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás, fundamentos. España: Universidad Politécnica de Valencia. 10 p.

Parajuli, P. (2011). Biogas measurement techniques and the associates errors. Finland: University of Jyväskylä.

Ramírez, R. y González, S. (2010). Sociedad, trabajo y población en Fredonia (Antioquia), 1830-1852. Una perspectiva demográfica y socio-económica según los censos y padrones. En: Historia y Sociedad No. 18. Medellín. 148 p.

Rodríguez, N. (2010). Seminario Internacional Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos, Siglo XXI: Manejo de residuos en la agroindustria cafetera. Cenicafé, 10 p.

Rodríguez, N. y Zambrano, D. (2010). Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. Centro Nacional de Investigaciones del café [Cenicafé] Avances Técnicos, 393. 7 p.

Rosa, R. (2015). Producción de biogás en sustrato sólido mediante la digestión anaerobia de pulpa de café. Xalapa, México: Universidad Veracruzana. 105 p.

Rozenkranz, F. (2013). Estudio del comportamiento de reactores anaerobios de tipo ASBR frente a compuestos de difícil degradación y/o efectores negativos. Chile: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso; España: Universidad de Santiago de Compostela. 194 p.

Schmidt, L. (1998). The engineering of chemical reactions. New York: Oxford University Press, 536 p.

Vera, A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos, Producción de gas y saneamiento de efluentes. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. 64 p.

Welfare and Coffee. (2012). Café 2do producto más comercializado en el mundo. Tomado de: <http://welfareandcoffee.blogspot.com.co/2012/06/cafe-2do-producto-mas-comercializado-en.html>.

ANEXO 1

CÓMO PRODUCIR GAS A PARTIR DE PULPA DE CAFÉ

- GUÍA PARA CAFICULTORES Y ESTUDIANTES -

La pulpa de café resultante después del beneficio del grano es un material orgánico que, debido a la alta producción en algunas regiones y a la mala disposición que se hace de ella, causa serios problemas ambientales, ya que contamina las fuentes de agua y los suelos, genera malos olores y ayuda a que proliferen mosquitos y otros vectores causantes de enfermedades. Por esto es urgente encontrar soluciones prácticas que ayuden a mitigar el daño y aprovechar dicha pulpa, pues es un material valioso para la obtención de otros productos.

Una de las formas en que se puede aprovechar la pulpa del café es en la producción de un gas llamado metano y cuya fórmula química es CH_4 , el cual puede ser utilizado en la finca o en la casa como combustible, bien sea para favorecer el secado del grano que se va a vender, para calentar la hoguera en casa o el agua para el baño diario y mediante un proceso sencillo de filtrado se puede usar para cocinar los alimentos. Este gas, también llamado biogás, se puede transformar en electricidad mediante montajes especializados que pueden favorecer a comunidades enteras.

Para obtener biogás a partir de la pulpa de café se utilizan a nivel mundial diferentes procedimientos, en este documento se explica la forma de hacerlo utilizando un proceso anaerobio, es decir, utilizando unas bacterias que en ausencia de oxígeno transforman la materia orgánica en gas metano y lodo fertilizante. Uno de los sistemas que se aplican es el llamado Reactor Flujo Pistón –PFR–, el cual consiste en un tanque dispuesto de forma longitudinal y que tiene tres orificios a través de los cuales se ingresan los materiales a utilizar, sale el gas que se produce y el lodo que se genera en el proceso. Cabe aclarar que dicho lodo es útil como fertilizante o mejorador de suelos. Un diseño generalizado de reactor PFR se muestra en la Figura 1.

Debido a que este tipo de reactores son costosos cuando se construyen a nivel industrial, se propone en este documento explicar la forma de construirlos de manera artesanal o casera y preferiblemente con materiales reciclados.

El primer paso consiste en elaborar una lista de los materiales necesarios, los cuales dependen de la capacidad del reactor que se desee fabricar. En este documento se explica cómo construir un reactor PFR de 400 L, apto para procesar unos dos litros y medio diarios de pulpa de café (2,5 L/día).

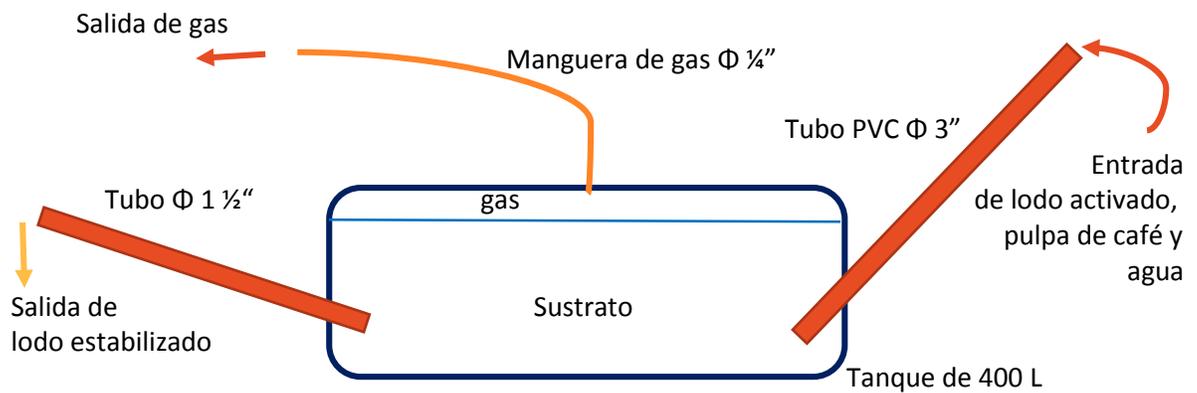


Figura 1. Representación gráfica de un reactor flujo pistón –PFR, para producción de biogás y lodo activado, con capacidad de 400 L.

Materiales:

- Dos tanques plásticos de polipropileno de alta densidad de 200 L cada uno, sirven de los que contienen fertilizantes líquidos o plaguicidas, bien lavados con agua y jabón.
- Un metro de tubería PVC sanitaria o aguas lluvias de 3 pulgadas de diámetro para el ingreso del lodo activado, el agua y la pulpa de café.
- Un metro de tubería PVC sanitaria o aguas lluvias de 1 ½ pulgada de diámetro para la salida del lodo estabilizado o fertilizante.
- Dos metros de manguera para gas.
- Una llave de paso para el gas.
- Pega PVC para unir los tanques por el fondo y los accesorios de PVC. Así como cinco neumáticos viejos de llantas de carro o moto.
- Un rollo de Teflón para evitar fugas de gas o agua.
- Dos barras de silicona.
- Pegante fuerte para los neumáticos.
- Un balde para recolectar el lodo estabilizado o saliente.

El sustrato o material productor de gas es el siguiente:

- 70 L de lodo activado, que puede ser recogido de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad o municipio. También se puede tomar de algún pozo séptico en funcionamiento o se puede reemplazar con estiércol de cerdo u otros animales y agua contaminadas para asegurar buena cantidad de bacterias productoras de biogás. No olvidar utilizar tapabocas, guantes, gafas, delantal, botas y los elementos de protección que eviten contacto de la piel con dicho lodo.
- 84 L de agua limpia –del acueducto o de cualquier fuente de agua.
- 196 L de pulpa de café, preferiblemente de no más de cinco días de despulpado.

La cantidad total de sustrato es de 350 L y los 50 L restantes se dejan vacíos para almacenamiento del biogás generado. Se debe dejar claro que el biogás producido se acostumbra recolectarlo en bolsas grandes de polietileno preferiblemente dentro de zanjas en la tierra de hasta 15 metros de longitud, por lo tanto el sistema aquí propuesto requiere tener en cuenta esta aclaración para evitar pérdidas del mismo y poder almacenar el gas adecuadamente. De lo contrario se debe utilizar el biogás directamente a medida que se genera, para lo cual se recomienda instalar un manómetro que indique la presión del mismo y así evitar accidentes.

Los materiales y la forma de construir el reactor dependen de la creatividad de cada persona, teniendo en cuenta que hay quienes son más prácticos que otros. Lo importante es atreverse a iniciar la construcción e ir resolviendo cada situación en el momento oportuno. Es importantísimo evitar las fugas de gases y líquidos, pues de ello depende el buen funcionamiento del reactor, por ello son importantes los pegamentos, los neumáticos y el sellado cuidadoso de la unidad.

Para empezar se deben cortar los fondos de los dos tanques de 200 L y unirlos con pegante y neumáticos como se muestra en las Figuras 2 y 3.



Figura 2. Tanques de 200 L cada uno unidos por sus respectivos fondos.



Figura 3. Tanques unidos herméticamente con neumáticos de motos y pegantes.

Seguidamente se adaptan los tubos de PVC y la manguera para la salida de los gases. El tubo de PVC de 3 pulgadas de diámetro se utiliza para la entrada del sustrato –lodo activado, agua y pulpa de café-, el de 1½ pulgada se emplea para la salida del lodo estabilizado. Las Figuras 4 y 5 muestran el sistema ensamblado.



Tanque para almacenamiento de gas

Figura 4. Reactor PFR ensamblado y listo para poner en funcionamiento.



Figura 5. Vista lateral del reactor PFR junto con pulpa de café lista para ser introducida en el sistema.

Para una mejor comprensión del proceso seguido en la fabricación de este reactor PFR y la producción de biogás a partir de pulpa de café, puede remitirse al siguiente link donde se presenta un video relacionado con la temática propuesta.

https://www.youtube.com/watch?v=5X_qsN3U9q4&feature=youtu.be

RECOMENDACIONES

Aunque el reactor PFR de 400 L fabricado artesanalmente como parte de esta investigación tuvo un buen desempeño, es recomendable tratar de conseguir tanques de una sola unidad, sin uniones ni empates, con el fin de evitar fugas de líquidos y gases, pues de ello depende el buen funcionamiento de los mismos. Además, si se desea implementar sistemas de mayor capacidad es preferible hacerlos con materiales más resistentes y de fabricación industrial.

Con esta investigación se pudo comprobar que los lodos activados procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales son recomendables para la puesta en marcha de reactores anaerobios.

El biogás generado mediante el aprovechamiento de pulpa de café en un reactor PFR, debe ser purificado para convertirlo en energía aprovechable. No obstante se puede utilizar en situaciones menos riesgosas para los equipos como en el calentamiento de alimentos, calentamiento de agua o sistemas de secado de café. De todas formas, siempre se debe tener en cuenta que el gas metano (CH_4) es explosivo y combustible, por lo tanto se debe contar con expertos en el tema para realizar montajes e instalaciones seguras, optimizando además su utilización.

El lodo estabilizado de esta manera también requiere de algunas pruebas y ensayos para determinar su calidad y sobre todo su inocuidad para los cultivos, animales y para el medio ambiente. Por lo tanto es recomendable contar con asesoría técnica especializada para hacer buen uso de este recurso.

En la actualidad las tecnologías de información y comunicación son una importante herramienta para tener en cuenta a la hora de resolver problemas tan graves para el ambiente como es el de los residuos del beneficio del café, basarse en ellas y explorarlas sin temor es tarea de vital importancia para las generaciones presentes y futuras.