

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A
PARTIR DE LODOS RESIDUALES RECOLECTADOS DE UNA PTAR, EN UN
REACTOR DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

MARÍA JOSÉ JARAMILLO GUTIÉRREZ
DIEGO FERNANDO TAMAYO MATEUS

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A
PARTIR DE LODOS RESIDUALES RECOLECTADOS DE UNA PTAR, EN UN
REACTOR DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

MARÍA JOSÉ JARAMILLO GUTIÉRREZ
DIEGO FERNANDO TAMAYO MATEUS

Proyecto Integral de Grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

Director,
CRISPÍN ASTOLFO CELIS ZAMBRANO
Químico, M.Sc., Ph.D.

Codirector,
ALEJANDRO PEREZ FLOREZ
Químico, M.Sc., Ph.D.

Orientador,
EDGAR FERNANDO MORENO TORRES
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA
BOGOTÁ D.C
2019

Nota de Aceptación:

Orientador Ing. Edgar Fernando Moreno Torres

Mag. Diana Milena Morales Fonseca
Jurado 1

Ing. Elizabeth Torres Gámez
Jurado 2

Bogotá D.C febrero 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectoría Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo De Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios de ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Expresar nuestro agradecimiento a la Pontificia Universidad Javeriana por brindarnos la oportunidad de realizar este trabajo de grado, disponer a nuestro servicio su personal, sus instalaciones y equipos requeridos para el desarrollo del mismo, apoyarnos con información cuando la requeríamos y por su aporte económico.

Agradecemos al Ph.D. Crispín Astolfo Celis Zambrano, quien además de ser el director del departamento de química de la Pontificia Universidad Javeriana y fue nuestro director, nos apoyó de forma constante en nuestro aprendizaje y desarrollo del proyecto, depositando su confianza en nuestras capacidades para poder culminar este proyecto de forma satisfactoria.

También queremos agradecer al Ph.D. Alejandro Pérez Flores, quien fue nuestro codirector durante todo el proyecto y además de ser un gran profesor fue un gran apoyo para nosotros ayudándonos en momentos críticos del proyecto y abriendo las puertas del laboratorio de química de la Pontificia Universidad Javeriana depositando su confianza y respaldo en nosotros.

Así mismo, agradecemos al Ingeniero Edgar Fernando Moreno Torres, por brindarnos orientación metodológica con críticas constructivas para poder culminar el proyecto de la mejor manera posible.

Adicionalmente, a nuestras familias, quienes desde el primer día de estudio nos brindaron la fuerza y apoyo necesario, para crecer como personas, ser los mejores profesionales y que con su apoyo incondicional nos ayudaron, para culminar con satisfacción este trabajo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	19
1. MARCO TEÓRICO	20
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	20
1.1.1 Las etapas del proceso.	22
1.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	24
1.2.1 Tipo de sustrato.	24
1.2.2 Tipo de inóculo.	25
1.2.3 Temperatura.	25
1.2.4 pH:	26
1.2.5 Sólidos totales (ST):	27
1.2.6 Tiempo:	28
1.2.7 Relación C/N:	29
1.2.8 Demanda química de oxígeno (DQO):	30
1.3. TIPOS DE REACTORES	30
1.3.1 Sistemas Continuos:	30
1.3.2 Sistemas Semi – Continuos.	32
1.3.3 Sistemas discontinuos.	34
1.4 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM)	35
1.5 BIOGÁS	37
2. METODOLOGÍA	39
2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS	39
2.2 ESTABILIZACIÓN DE LOS REACTORES	43
2.3 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE LOS LODOS DIGESTADOS	50
2.3.1 Toma de muestras.	50
2.3.2 pH y Temperatura.	51
2.3.3 Determinación de los sólidos.	51
2.3.4 Demanda química de oxígeno (DQO).	52
2.3.5 Nitratos, nitritos y fósforos.	54
2.3.6 Densidad.	55
2.4 ANÁLISIS DE CARBONO TOTAL (TOC)	56
2.6 CROMATOGRAFÍA DE GASES	57
2.7 POTENCIAL TEÓRICO DE METANO (ECUACION DE BUSWELL)	58
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS	60
3.1 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	60

3.1.1 Análisis del biogás.	63
3.2 REDUCCIÓN CARBONO ORGÁNICO	64
3.3 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	65
3.4 pH	68
3.5 TEMPERATURA	70
3.6 SÓLIDOS TOTALES, SÓLIDOS FIJOS, SÓLIDOS VOLÁTILES Y HUMEDAD	71
3.7 ANÁLISIS DE NITRATOS, NITRITOS, FÓSFOROS	73
3.8 BALANCE DE MATERIA	76
3.9 POTENCIAL ENERGÉTICO TEÓRICO	79
4. CONCLUSIONES	81
5. RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFIA	85
ANEXOS	90

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaerobia.	26
Tabla 2. Rango de valores de pH en la generación de biogás.	27
Tabla 3. Características del biogás	37
Tabla 5. Variables fijas de operación.	43
Tabla 6. Características de los macronutrientes de los lodos en sus distintas etapas.	44
Tabla 7. Cantidades másica de macronutrientes para una concentración de 15L.	47
Tabla 8. Sumatoria de compuestos inorgánicos para ecuación de Buswell.	58
Tabla 9. Datos curva de calibración.	61
Tabla 10. Porcentaje de metano para los reactores 1 y 2 a diferentes días de operación	62
Tabla 11. Comparación metano experimental y metano teórico.	63
Tabla 12. Porcentaje de solidos totales y fijos de los reactores 1 y 2 respectivamente.	99
Tabla 13. Concentraciones de inhibidores que afectan la producción de biogás.	108
Tabla 14. Porcentajes de inóculo que deberían ser agregados a los biodigestores según su edad.	109
Tabla 15. Primera muestra de TOC.	110
Tabla 16. Segunda muestra de TOC para sólidos.	110
Tabla 17. Tercera muestra de TOC para sólidos.	111
Tabla 18. Cuarta muestra de TOC para sólidos.	111
Tabla 19. Cantidades másicas de macronutrientes para una concentración de 0.25L.	112
Tabla 20. Dirección de macronutrientes para hacer 0.25L de sustrato para alimentar el inóculo.	113

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Producción de biogás.	61
Gráfica 2. Curva de calibración de metano puro.	62
Gráfica 3. Reducción (%) de carbono orgánico en lodos residuales en los reactores R1 y R2.	64
Gráfica 4. DQO lodo disuelto R1.	65
Gráfica 5. DQO lodo disuelto R2.	66
Gráfica 6. DQO vs pH Reactor 1.	67
Gráfica 7. DQO vs pH Reactor 2.	67
Gráfica 8. Seguimiento pH del reactor 1.	69
Gráfica 9. Seguimiento pH del reactor 2.	69
Gráfica 10. Seguimiento de la Temperatura del reactor 1.	70
Gráfica 11. Seguimiento de la Temperatura del reactor 2.	70
Gráfica 12. ST vs SV reactor 1.	72
Gráfica 13. ST vs SV reactor 2.	72
Gráfica 14. Obtención de nitritos en R1 en un tiempo de 82 días.	74
Gráfica 15. Obtención de nitritos en R2 en un tiempo de 82 días.	74
Gráfica 16. Obtención de fósforos en R1 en un tiempo de 82 días.	75
Gráfica 17. Obtención de fósforos en R2 en un tiempo de 82 días.	76

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ruta de la digestión anaerobia.	22
Figura 2. Dependencia del pH en la actividad metanogénica.	26
Figura 3. Datos promedio sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos	28
Figura 4. Relación C: N desechos comunes	30
Figura 5. Esquema de un biodigestor continuo	31
Figura 6. Esquema biodigestor hindú	33
Figura 7. Esquema biodigestor chino	34
Figura 8. Esquema digestor batch	35
Figura 9. Factores que influyen en el ensayo de PBM.	36
Figura 10. Reactores CSTR esquematización aproximada de los reactores de la PUJ.	42
Figura 11. Cantidades másicas de micronutrientes para concentraciones de 15L.	45
Figura 12. Representación esquemática del tratamiento preliminar para el análisis físico-químico.	50
Figura 13. Representación esquemática de la lectura del pH de las muestras.	51
Figura 14. Reactor COD HANNA.	53
Figura 15. Equipo TOC-VCSH (Shimadzu)	56
Figura 16. Obtención del TOC (lar process analysers ag)	56
Figura 17. Cromatógrafo de gases GC-2010 (Shimadzu)	57
Figura 18. Aproximación balance de materia.	76
Figura 19. Tabla de equivalencias potencial energético.	80
Figura 20. pH del reactor 1 y reactor 2 respectivamente	93
Figura 21. Temperaturas del reactor 1.	95
Figura 22. Temperatura Reactor 2.	96
Figura 23. Concentración volumétrica de metano en ensayos BMP.	116
Figura 24. Porcentaje de metano para los ensayos de BMP.	116

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Reactores CSTR provistos por la PUJ.	40
Ilustración 2. Equipo de recirculación de aceite.	41
Ilustración 3. Medidor de flujo de gas (Shangai Instrument)	46
Ilustración 6. Viales para obtención de DQO.	54
Ilustración 7. Crisol de porcelana.	98
Ilustración 8. Horno de secado.	99
Ilustración 9. Vial de 10 mL	102
Ilustración 10. Equipo HANNA para medición de nitratos.	102
Ilustración 11. Reagente de nitrato.	103
Ilustración 12. Parámetros de nitrato medidos por el equipo HANNA.	103
Ilustración 13. Equipo HANNA para medición de nitritos.	103
Ilustración 14. Reagente de nitrito.	104
Ilustración 15. Parámetros de nitritos medidos por el equipo HANNA.	104
Ilustración 16. Equipo HANNA para medición de fósforos.	105
Ilustración 17. Reagente A y B para fósforos.	105
Ilustración 18. Vial de rango alto para medición de DQO.	106
Ilustración 19. Reactor COD.	106
Ilustración 20. Equipo HANNA para medición de DQO.	107
Ilustración 4. Botellas de ensayo con lodos activados en un medio anaeróbico.	114
Ilustración 5. Obtención del volumen del biogás.	114

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Esquema del procedimiento para la estabilización de los reactores con alimento de lodo primario. (Prueba)	48
Diagrama 2. Esquema del procedimiento para la estabilización de los reactores con alimento de macro y micronutrientes	49
Diagrama 3. Esquema del procedimiento para determinar el potencial de biometanización de un determinado sustrato.	115

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. pH	91
Anexo B. Temperatura	94
Anexo C. Sólidos totales, sólidos volátiles, sólidos fijos y humedad	97
Anexo D. Tiempo de retención	101
Anexo E. Pruebas de nitratos, nitritos y fósforos	102
Anexo F. Pruebas Demanda Química de Ox	106
Anexo G. Inhibidores	108
Anexo H. Edad y proporción en porcentaje que se agrega de material inoculador, en la etapa de arranque de un biodigestor	109
Anexo I. Análisis TOC	110
Anexo J. Ensayo BPM	112

ABREVIATURAS

Abreviatura	Término
AGV	Ácidos grasos volátiles
TOC	Carbono orgánico total
TC	Carbono total
IC	Carbono inorgánico
DA	Digestión anaerobia
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
PUJ	Pontificia Universidad Javeriana
PBM	Potencial bioquímico de metano
HR	Rango Alto
CSRT	Reactor Continuo de Tanque Agitado
I: S	Relación Inóculo: Sustrato
R.O	Residuos orgánicos
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos Volátiles
THR	Tiempo de retención hidráulica
TRS	Tiempo de retención de solidos

GLOSARIO

BIOGÁS: es una mezcla de gas producido por microorganismos, que transforman material biodegradable en condiciones anaerobias. Se constituye principalmente de 60%-70% metano, 30%-40% dióxido de carbono y otros gases, en su mayoría impurezas del biogás.

BIOMASA: la biomasa es materia orgánica de origen vegetal o animal, entre las que se incluyen residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada para uso energético.

BIORREACTOR: es un recipiente que mantiene un ambiente biológicamente activo, en el cual se lleva a cabo un proceso químico que involucra organismos o sustancias bioquímicamente activas a través de procesos aerobios o anaerobios, con la intención de obtener metano como producto deseado.

DIGESTIÓN ANAEROBIA: es un proceso microbiológico en ausencia de oxígeno, en el que la materia orgánica se transforma por acción de microorganismos en biogás y en ocasiones también en bioabono.

ENERGÍA RENOVABLE: energía derivada de los recursos ilimitados e inagotables que son usados como alternativa a los combustibles fósiles y contaminantes.

FERMENTACIÓN: cambios químicos dados por microorganismos que transforman la materia prima, dándoles diferentes características a las que originariamente tenía.

LODOS: son sólidos/líquidos con un contenido variable de humedad, provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, los cuales no han sido sometidos a procedimientos de estabilización.

LODOS DIGESTADOS: residuos que quedan decantados en el reactor después de cierto tiempo.

METANO: es el hidrocarburo alcano más sencillo, cuya fórmula química es CH_4 . Es un producto de la digestión anaerobia y es el componente principal del biogás.

pH: está en función de la concentración de CO_2 en el gas, de la concentración de ácidos volátiles y de la propia alcalinidad de la materia prima.

RESUMEN

La presente investigación surge con el interés de evaluar las características físicas-químicas y el potencial de generación de biogás de los lodos residuales obtenidos por una PTAR, este estudio se realizó por medio del proceso de la digestión anaerobia en dos reactores continuos de tanque agitado (CSTR) de 20L, con el objetivo de usar esta materia prima como energía renovable.

Inicialmente, se realizó una revisión bibliográfica para poder obtener las condiciones de operación como la temperatura mesófila a 39°C, la agitación de 90rpm, el pH en un rango de 6.2-8.0, entre otras, las cuales serían fijas durante todo el proceso, luego se prosigió a alimentar los reactores con una mezcla de macro y micronutrientes que ayudarían a aumentar la producción de biogás y se evaluó los parámetros que influyen directamente sobre este como lo son los sólidos totales, sólidos volátiles, DQO, nitritos, fósforos, tiempo de retención y TOC.

Finalmente, se realizó una comparación de la producción de biogás a través de lecturas de cromatografía de gases entre ensayos BMP en envases de 0.25L y los reactores de 20L. Todos estos procedimientos se realizaron en la Pontificia Universidad Javeriana la cual brindó todos los recursos materiales para poder realizar este proyecto.

A partir de la implementación del proceso de digestión anaerobio se comprobó que los lodos residuales son materiales orgánicos con gran potencial energético ya que se obtuvieron porcentajes de biogás considerables con un contenido de metano promedio del 31%, esto teniendo en cuenta que, era la primera vez que se usaban estos reactores CSTR, por tanto, si bien está alejado de las grandes producciones de biogás que oscilan en un rango de 50 a 75 % de metano¹, para un inicio es una buena producción de metano en biogás.

PALABRAS CLAVE: Reactor, biogás, lodos, energías renovables, digestión anaerobia, cromatografía de gases, metano.

¹ RED MEXICANA DE BIOENERGÍA, Biogás, recuperado de: "<http://rembio.org.mx/areas-tematicas/biogas/>"

INTRODUCCIÓN

A través del tiempo han existido diversas formas de obtención de energía, sin embargo, factores como deforestación, tala de árboles, producción de energía a través de fósiles, han llevado a que el planeta sufra consecuencias en sus ecosistemas, así que existe la urgencia de encontrar nuevas alternativas para producir energía, sin afectar el medio ambiente, sin gastar recursos naturales, por ello la sustitución de los hidrocarburos por fuentes alternativas sustentables de generación de energía, se ha transformado en una prioridad de los últimos años².

El desarrollo de investigación aplicada es imprescindible para la utilización de estos recursos renovables. Una de las posibles alternativas para la generación de energía es el tratamiento de residuos orgánicos, para la posterior obtención de biogás, que hace parte del grupo de combustibles renovables. Este gas que aparte de tener este aspecto “limpio”, puede ser obtenido con materia orgánica con altos valores de DQO, como lo son los residuos orgánicos urbanos³.

Estos últimos, representan una problemática, debido a su gran cantidad y la deficiencia de un sistema de almacenamiento que no afecte a la población y al medio ambiente. Por tal razón la búsqueda de un proceso que pueda aprovechar el potencial de este desecho para el bienestar humano, es importante. Se destacan metodologías como las digestiones anaerobia y aerobia, que son procesos que permiten utilizar residuos orgánicos para un aprovechamiento energético, y han venido tomando fuerza con el pasar del tiempo, debido a que representa una alternativa factible en el uso de los recursos no renovables para proveer energía, además de generar una respuesta a la gran producción de residuos y su acumulación en diversas zonas como los son las PTAR.

² MORERO, B. y CAMPANELLA, E. ASimulación del Proceso de Absorción Química con Soluciones de Aminas para la Purificación Biogás. Información Tecnológica, vol.24, n°.1, p.25-32. (2013)

³ SOUZA, José y SCHAEFFER, Lirio. SISTEMA DE COMPRESIÓN DE BIOGÁS Y BIOMETANO. 2013, vol.24, n.6, pp.03-08.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la producción de biogás a partir de lodos residuales recolectados de una PTAR, en un reactor de la Pontificia Universidad Javeriana.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Definir las condiciones de operación en el reactor CSTR para la degradación adecuada de la materia orgánica y la producción de biogás.
2. Caracterizar las propiedades físico-químicas de los lodos residuales contenidos en el reactor CSTR.
3. Evaluar la calidad del gas producido y su potencial energético teórico.

1. MARCO TEÓRICO

En las PTAR, diariamente se producen residuos orgánicos en gran cantidad, lo que ocasiona problemas sanitarios, estos residuos son llamados lodos residuales, que se acumulan en gran cantidad, por esta razón y para solventar igualmente el problema de salubridad, son aprovechados dándoles uso en la producción de biogás, para ello, es necesario usar un proceso específico, este proceso es denominado digestión anaerobia, muy comúnmente usado en la producción de biogás.

Para llevar a cabo la digestión anaerobia se utilizan generalmente dos tipos de sistemas: los continuos y los discontinuos. En los procesos discontinuos o llamados batch, los reactores se llenan una vez con sustrato e inóculo y se cierran durante un tiempo de retención para finalmente abrirse y retirar el efluente del reactor⁴. En los sistemas continuos, por el contrario, el sustrato se introduce continuamente en el reactor, retirando de este la misma cantidad que se introdujo⁵.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso biológico degradativo que sucede en condiciones de ausencia de oxígeno, en el cual, parte de la materia orgánica (lodos residuales) es transformada por la acción bacteriana llevándola a una conversión de gases (biogás), compuesta por dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). Este proceso biológico se realiza en biodigestores, conocidos comúnmente como biorreactores, los cuales son contenedores cerrados donde la materia orgánica permanece aislada en un periodo de tiempo, facilitando el trabajo microbiano para lograr que el sustrato y el inóculo interaccionen generando una descomposición, esto debido al estímulo que tienen los microorganismos al no tener gran cantidad de oxígeno y no al favorecimiento de la reproducción microbiana, por ello, el crecimiento microbiano es lento en estos procesos anaerobios⁶.

Este proceso bioquímico hace que sea posible convertir distintos tipos de residuos tales como residuos animales, urbanos, vegetales, u otros tipos de productos y subproductos orgánicos, que pueden ser útiles para la fermentación, donde el 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano, que hace que se obtenga un proceso exitoso. Dentro de este grupo de microorganismos, que

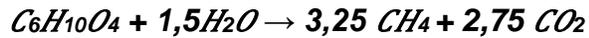
⁴ GUERRERO OLIVER OTERO, Evaluación del potencial de producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de la caña de azúcar, Universidad ICESI facultad de ciencias naturales programa de química, Cali 2017.

⁵ DÍAZ, A. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya. Tesis de maestría. Escola de Camins. Barcelona. 2013.

⁶ RIVAS C., Mota M. Temas de bacteriología y virología médica. Cap 21. Bacterias anaerobias. p.356

disponen de un amplio rango de respuesta a la molécula de oxígeno, intervienen las bacterias anaerobias facultativas quienes pueden desarrollar un metabolismo tanto respiratorio aprovechando el oxígeno, como fermentativo en ausencia de oxígeno, y las cuales utilizan en forma secuencial los productos metabólicos generados en cada etapa que interviene en el proceso⁷.

Se puede describir la digestión anaerobia según la siguiente reacción general⁸:



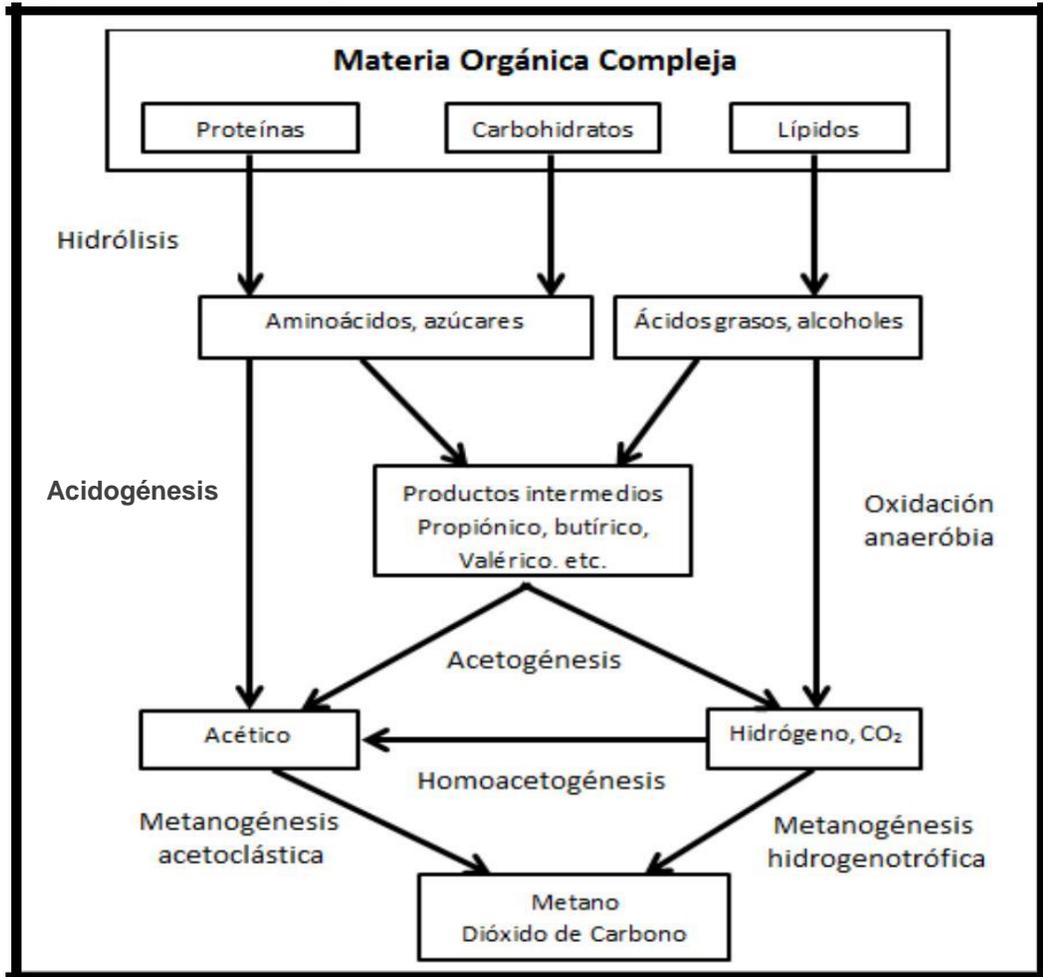
Para que este proceso se lleve a cabo de forma normal, es indispensable contar con la acción conjunta de los distintos tipos de bacterias de las etapas que se explicarán posteriormente, ya que la falta o el exceso de estas, darían como resultado un desequilibrio cinético lo que conlleva a una anomalía o incluso el fracaso de dicha fermentación⁹. Por esto, este proceso se lleva a cabo en cuatro etapas, por las cuales se obtienen diferentes productos y que son mostrados a continuación en la figura 1.

⁷ VARNERO MORENO. M.T. Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Manual del biogás. 2011. Chile, p.14-19.

⁸ BABSON M, David M. et al, Anaerobic digestion for methane generation and ammonia reforming for hydrogen production: A thermodynamic energy balance of a model system to demonstrate net energy feasibility, The Ohio State University, United States. 2013. p. 496

⁹ GUERRERO OLIVER OTERO, Evaluación del potencial de producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de la caña de azúcar, Universidad ICESI facultad de ciencias naturales programa de química, Cali 2017

Figura 1. Ruta de la digestión anaerobia.



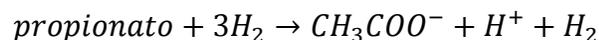
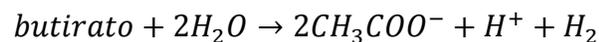
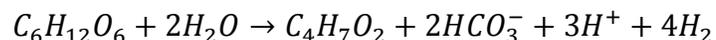
Fuente: PAVLOSTATHIS. S. G. y GIRALDO. E. Kinetics of anaerobic treatment. Volumen 21, 1991.

1.1.1 Las etapas del proceso. El proceso de digestión anaeróbica se divide en cuatro etapas fundamentales, las cuales se describen a continuación:

1.1.1.1 Hidrólisis. Primera etapa de generación de biogás, en la cual los compuestos complejos del material inicial (carbohidratos, grasas y proteínas) se dividen en compuestos orgánicos mucho más simples (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos). En esta etapa las bacterias hidrolíticas liberan enzimas que descomponen el material por medios bioquímicos. Esta etapa es considerada como limitante de la velocidad del proceso por el alto contenido sólidos totales, los cuales son muy resistentes a la degradación microbiológica, donde se recomienda un

tamaño de partícula de 2mm¹⁰. Este limitante en la velocidad global del proceso puede ser reducido por medio del uso de pre tratamientos fisicoquímicos como lo son trituración del sustrato, ataque con ultrasonido, ataque químico, bien sea ácido o alcalino o pretratamientos térmicos¹¹, esto con el fin que genere un aumento para la tasa de hidrólisis y un menor tiempo de retención¹².

1.1.1.2 Acidogénesis. Etapa donde los productos intermedios formados en el proceso hidrolítico se dividen por medio de bacterias fermentadoras para formar compuestos orgánicos más reducidos (ác. acético, ác. butírico, etanol, ác. láctico, ác. propiónico y ác. valérico) junto con dióxido de carbono e hidrógeno. La naturaleza de los productos que se forman en esta etapa es relacionada por la concentración del hidrógeno intermedio. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias radica principalmente en la producción del alimento para los grupos de bacterias que actúan en las etapas posteriores (metanogénicas), además eliminan las trazas de oxígeno que puedan haber disuelto en el sistema, debido a que se compone de bacterias facultativas denominadas bacterias formadoras de ácidos.¹³ Las siguientes reacciones fueron obtenidas a partir del libro Digestión Anaerobia¹⁴:



1.1.1.3 Acetogénesis. Por medio de bacterias acetilénicas los productos formados deben ser oxidados y se convierten en precursores de biogás (acetato, hidrógeno y anhídrido carbono). En esta etapa es muy importante controlar el contenido de

¹⁰ ORTEGA VALBUENA, P.M. Desarrollo de un montaje por etapas a nivel banco para la obtención de biogás a partir de residuos vegetales. Trabajo de grado. Ingeniería Química. Bogotá D.C. Universidad de América. 2014 p. 26.

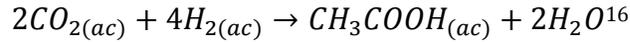
¹¹ CENDALES LADINO, E. D. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Tesis de maestría. Bogotá D.C. Universidad Nacional. 2011. p. 13.

¹² OTEGA VALBUENA, P.M. Op. Cit.,p.27

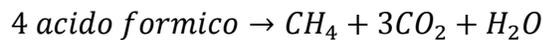
¹³ GARCÍA RODRÍGUEZ A.M., GÓMEZ FRANCO J.D. Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos de la central de bastos de Bogotá mediante digestión anaerobia. Trabajo de grado. Ingeniería Química. Bogotá D.C. Universidad de América. 2016 p. 27

¹⁴ DIAZ-BAEZ María consuelo, ESPITIA VARGAS Sandra, MOLINA PEREZ Francisco. Digestion anaerobia una aproximación a la tecnología. Universidad Nacional de Colombia. Bogota, junio de 2002.

hidrógeno, ya que, si es excesivamente alto, impide la conversión de los productos intermedios de la acidogénesis. En la etapa acetogénica la mayoría de las bacterias anaeróbicas ya han consumido todo el alimento presente de la biomasa y los productos generados son los que las bacterias metanogénicas utilizarán como sustrato¹⁵.



1.1.1.4 Metanogénesis. Etapa final de generación de biogás, donde se convierten el ácido acético, el hidrógeno y el dióxido de carbono en metano por medio de bacterias metanogénicas específicamente anaeróbicas.¹⁷ Los microorganismos metanogénicos pueden ser los más importantes en el proceso de digestión anaerobia, ya que estos son los responsables de la formación del gas metano y de la eliminación del medio de productos de los grupos anteriores.



1.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico complejo, es de vital importancia mantener las condiciones óptimas para así permitir la realización tanto de las reacciones químicas dentro del reactor, como las reacciones bioquímicas intracelulares que dan vida a los organismos que llevan a cabo dicho proceso¹⁸.

1.2.1 Tipo de sustrato. Es la biomasa que aporta el consorcio microbiano encargado de llevar a cabo las diferentes etapas de la degradación. El sustrato que es suministrado a los reactores será usado como fuente de alimento para los microorganismos, proporcionándoles la energía necesaria para que estos puedan

¹⁵ VARNERO MORENO. M.T. Op. Cit., p.35-44.

¹⁶ DIAZ-BAEZ María consuelo, ESPITIA VARGAS Sandra, MOLINA PEREZ Francisco. Digestion anaerobia una aproximación a la tecnología. Universidad Nacional de Colombia. Bogota, junio de 2002.

¹⁷ GUTIÉRREZ TAMAYO P.A., RODRÍGUEZ TORRES C.C. Propuesta de mejora del proceso de producción de biogás en Jerusalén (Cundinamarca). Trabajo de grado. Ingeniería Química. Bogotá D.C. Universidad de América. 2018 p. 32

¹⁸ MONTES CARMONA M. E., Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid. 2008, p.37

completar as cuatro fases de la digestión anaerobia y así llegar al objetivo de producir biogás.

1.2.2 Tipo de inóculo. En este proyecto se tomó como inóculo lodos primarios que fueron traídos de una PTAR, los cuales son tipos de fangos producidos durante los procesos de tratamiento primario de las aguas residuales y estos se generan a partir de la decantación primaria a través del proceso de separación por gravedad de los sólidos en suspensión presentes en el agua residual; la cantidad de lodo primario que se genera mediante estos procesos, se encuentra sujeta a parámetros tales como el volumen del agua tratada, la concentración de sólidos suspendidos presentes en el recurso y la eficiencia del sistema de decantación responsable del tratamiento¹⁹.

Algunas de las características generales de los lodos primarios son su color, que normalmente se encuentra en tonos grises o cafés, la consistencia lodosa con grandes cantidades de materia orgánica, vegetales, frutas, papel, etc., con olor altamente fermentable y putrefacta y con concentraciones de SV y ST de 4 – 10% y 60 – 80% respectivamente.

1.2.3 Temperatura. Este es uno de los parámetros de mayor relevancia en el proceso anaeróbico, ya que define las zonas en que el proceso puede llevarse a cabo²⁰, también es vista como el factor en potencia para aumentar la eficiencia de los sistemas, ya que permite determinar el tiempo de retención para la digestión y degradación de la materia orgánica, dentro del digestor, la degradación se incrementa en forma geométrica con los aumentos de la temperatura de trabajo, además se incrementa la producción de biogás²¹.

Dentro del tratamiento anaeróbico se pueden distinguir tres rangos de temperaturas definidos:

- a) Digestión Psicrófila: La producción de gas varía de una estación a otra dependiendo de la temperatura atmosférica, tiene las ventajas de que sus estructuras son simples y de baja inversión.
- b) Digestión Mesófila: La descomposición de la carga es más lenta que la Termófila, pero con menos consumo de energía.
- c) Digestión Termófila: Se caracteriza por una digestión rápida, alto rendimiento de gas y corto tiempo de retención²².

¹⁹ FIBRAS Y NORMAS DE COLOMBIA S.A.S. Lodos activados: Tratamientos y métodos. 2018

²⁰ CONTRERAS L; DOMÍNGUEZ P. "Producción de Biogás con fines Energéticos. De lo histórico a lo Energético. Revista Futuros Volumen VI".

²¹ BAUTISTA BUHIGAS A. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos (Estelí, Nicaragua). Universidad Carlos III de Madrid, Escuela politécnica superior. Leganés, España, 2010.p20

²² Tomado de <http://www.redagricola.com/reportajes/energia/lo-basico-para-entender-el-biogas>

En la siguiente tabla se muestran los distintos rangos de temperaturas a los que se puede trabajar en la fermentación anaerobia:

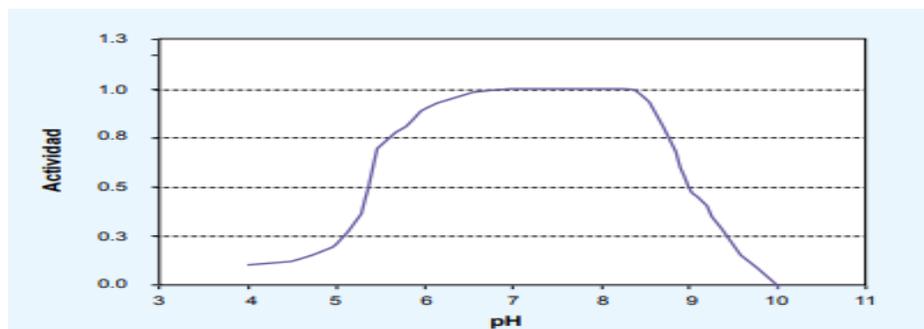
Tabla 1. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaerobia.

FERMENTACIÓN	MÍNIMO	ÓPTIMO	MÁXIMO
Psicrofílica	4-10 °C	15-18 °C	25-30 °C
Mesofílica	15-20 °C	34-38 °C	40-45 °C
Termofílico	25-45 °C	50-60 °C	75-80 °C

Fuente: MINISTERIO DE ENERGÍA. PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY. Manual del biogás. FAO. Santiago de Chile, 2011.

1.2.4 pH: El valor óptimo para la digestión metanogénica es de 6.5-7.5, cuando baja de 6.4 o sube de 7.6 (figura 2) puede inhibir el proceso de fermentación o incluso detenerlo²³.

Figura 2. Dependencia del pH en la actividad metanogénica.



Fuente: SPEECE. R. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. Drexel University. Pensilvania. Estados Unidos. 1983

Cuando el pH es bajo se puede agregar fertilizante, cenizas, agua urea diluida, hidróxido de calcio o una mezcla de ambos y licor fermentado²⁴ y si el pH es alto se puede agregar algunos de los siguientes elementos:

²³ GARCÍA M. C. et al. Estudio del proceso bioquímico de fermentación en digestores para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos orgánicos provenientes del campus de la Universidad de El Salvador. Ciudad Universitaria. El Salvador. Agosto de 2010.

²⁴ Tomado de Jairo Chaúr Bernal. "EL BIOGÁS" Boletín Didáctico N° 32. Bogotá, DC, abril de 2001

- Azufre en polvo: 150 a 250 g/m³
- Sulfato de Hierro 1 a 3 g/m³.
- La aspirina, (ácido acetilsalicílico)

Tabla 2. Rango de valores de pH en la generación de biogás.

Valor pH	Característica
6.5 – 7.5	Óptimo
Menor de 6.4	Retardo por ácidos
Mayor a 7.6	Retardo por amonios

Fuente: elaboración propia con base a CHAÚR BERNAL Jairo. El biogás. Bogotá D.C. 2001

1.2.5 Sólidos totales (ST): La cantidad de solidos totales en la materia orgánica influye directamente en la producción de biogás y calidad del metano contenido en el mismo, ya que si existiera una cantidad de mayor al 40% se presentaría un inicio de inhibición en el proceso, porque los ST limitan la homogeneidad del proceso afectando las bacterias metanogénicas como la producción de biogás.

Figura 3. Datos promedio sobre el contenido de sólidos totales de diversos residuos

Materias primas	% Sólidos totales
Residuos animales	
Bovinos	13.4 – 56.2
Porcinos	15.0 – 49.0
Aves	26.0 – 92.0
Caprinos	83.0 – 92.0
Ovejas	32.0 – 45.0
Conejos	34.7 – 90.8
Equinos	19.0 – 42.9
Excretas humanas	17.0
Residuos vegetales	
Hojas secas	50.0
Rastrojo maíz	77.0
Paja trigo	88.0 – 90.0
Paja arroz	88.8 – 92.6
Leguminosas (paja)	60.0 – 80.0
Tubérculos (hojas)	10.0 – 20.0
Hortalizas (hojas)	10.0 – 15.0
Aserrín	74.0 – 80.0

Fuente: MINISTERIO DE ENERGÍA. PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY. Manual del biogás. FAO. Santiago de Chile, 2011.

En los reactores CSTR, la carga de materia orgánica admitida de ST debe estar en un rango de 40-60% para asegurar un óptimo funcionamiento del proceso. No obstante, en el ANEXO C se podrá observar un artículo donde se evidencia como variable de proceso el contenido de sólidos totales llegando a conclusiones diferentes a las presentadas anteriormente. Por lo tanto, esta variable es de importancia relevante ya que, al evidenciar diferencias de porcentajes en la bibliografía, se pone en duda el real efecto de lo ST durante el proceso.

1.2.6 Tiempo. En este tipo de procesos hay que tener en cuenta diversos tiempos como lo son; el tiempo de retención hidráulica (TRH), este indica el tiempo que los desechos permanecen en el reactor en contacto con los microorganismos y su tratamiento depende de la velocidad del metabolismo microbiano. Las sustancias fácilmente degradables como los azúcares necesitan una TRH corto, pero las

sustancias complejas como las proteínas requieren una TRH más largo. Así mismo está el tiempo de retención de sólidos (SRT), este indica el tiempo que los microorganismos permanecen en el reactor para lograr un grado dado de estabilización de los desechos y mantener una tasa satisfactoria de biodegradación de contaminantes. En reactores continuos tanto el TRH como el SRT, se esperarían que fueran iguales. Y por último, el tiempo de mezclado, este indica el tiempo en el que logra homogeneizarse el flujo de entrada con el que se encuentra en el interior del tanque.

1.2.7 Relación C/N. El balance entre los macro y micronutrientes es esencial tanto para el crecimiento de los microorganismos, como para la producción de biogás. El carbono y el nitrógeno son los nutrientes esenciales en el proceso y por lo tanto se debe asegurar un suministro de estos en proporciones adecuadas; un exceso de carbono hace que éste no sea transformado por completo, disminuyendo el rendimiento del metano, y por otro lado un exceso de nitrógeno hace que cantidades de amoníaco indeseadas sean producidas, causando incluso la inhibición del crecimiento microbiano²⁵.

²⁵ DEUTSCHE GESSELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT, Guía sobre el Biogás, traducido por Cooperación tecnológica en el sector energético y el Programa Gestión Ambiental Urbana e Industrial en México, 5 ed. Gülzow 2010. p. 24.

Figura 4. Relación C: N desechos comunes

Relación C : N para varios tipos de desechos			
Agua Residuales	11:1	Paja de Maíz	112:1
Alfalfa	18:1	Paja de Trigo	122:1
Algas Marinas	19:1	Pastos	16:1
Amaranto	11:1	Pulpa de Cacao	16:1
Aserrín de Madera	805:1	Pulpa de Café	16:1
Bagazo de Caña	128:1	Ramas de Yuca	98:1
Basura Orgánica	25:1	Raquis de Banano	61:1
Cáscara de arroz	63:1	Restos de Fruta	35:1
Cáscara de Café	53:1	Restos de Habichuelas	24:1
Cáscara de Soya	33:1	Restos de Lino	90:1
Cáscara de Yuca	96:1	Tallos de Maíz	60:1
Cáscara de fruto de Cacao	38:1	Tomates	12,6:1
Cáscaras de Maní	31:1	Heces de Conejo	23:1
Heno	12:1	Estiércol de Vaca	16,6 – 25:1
Hojas Caídas	50:1	Gallinaza	12:1
Hojas de Banano	19:1	Heces de Ovejas	20:1
Hojas de Eucalipto	15:1	Heces de Cuyes	17:1
Hojas de yuca	12:1	Estiércol de Caballo	25:1
Leguminosas	12:1	Estiércol de Cerdo	15 – 30:1
Madera	700:1	Restos de Pollos	28,6:1
Mazorca de Maíz	49,9:1	Sangre de Cerdo	15 – 30:1
Paja de Arroz	72:1	Sangre de Vaca	15 – 30:1

Fuente: MONCAYO. G. Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás. 2008.

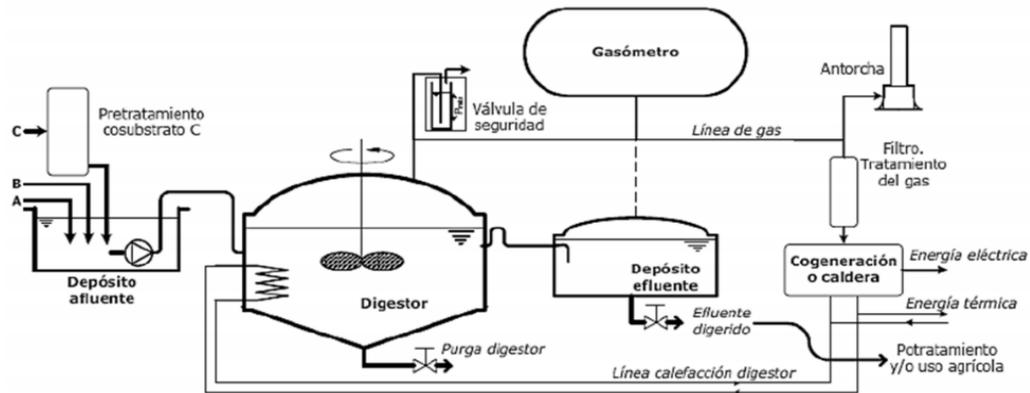
1.2.8 Demanda química de oxígeno (DQO). Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar toda la materia orgánica y oxidable presente en agua residual. Es por tanto una medida representativa de la contaminación orgánica de un efluente siendo un parámetro a controlar dentro de las distintas normativas de vertidos y que nos da una idea muy real del grado de toxicidad del vertido. Existen distintas formas de disminuir la DQO tales como los tratamientos físico-químicos, la electrocoagulación y el ozono.

1.3 TIPOS DE REACTORES

1.3.1 Sistemas Continuos. Este tipo de reactores se utilizan principalmente para tratamiento de aguas residuales, ya que tienen un alto grado de tecnología, control e instrumentación, además cuentan con un sistema de agitación y tienen la capacidad de regular su temperatura. La palabra continua refiere a que los procesos

no paran nunca, solo para mantenimientos grandes o por algún tipo de fallas, el proceso de la digestión en este tipo de reactor es controlada, pero su desventaja es la complejidad de manejar sustratos casi líquidos para que no se presente precipitación o incrustaciones que puedan dañar el reactor. Este tipo de sistemas cuentan con una alta eficiencia, TRH cortos y mejor calidad en los productos sin importar el tipo de biomasa que se encuentre en él.

Figura 5. Esquema de un biodigestor continuo.



Fuente: AGROWASTE. Digestión Anaerobia. España. 2013. p2

1.3.1.1 Reactor CSTR. El reactor CSTR es uno de los modelos más comunes para productos químicos en la ingeniería, a menudo se utiliza este modelo para estimar variables de operación de la unidad y alcanzar una salida específica, los reactores de tanque agitado de flujo continuo generalmente se aplican en procesos de tratamiento de aguas residuales, los cuales facilitan el uso velocidades de dilución rápidas haciéndolos resistentes a los desechos de ácidos grasos volátiles con pH bajo y pH alto.

Si el reactor se encuentra perfectamente mezclado, la composición de salida es la misma composición de la entrada al reactor, esta mezcla también se ve afectada por el tiempo de residencia y la velocidad de reacción. El tiempo de residencia o tiempo de retención hidráulica debe ser de 5 a 10 veces el tiempo de mezcla, esta aproximación que se hace es válida solo para fines de ingeniería²⁶.

El modelo matemático de esta clase de reactores funciona para todos los fluidos: líquidos, gases y lodos, a continuación, se mostrará el balance de materia para estos reactores en términos de molaridades:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generacion} = \text{Acumulación}$$

²⁶ Tomado de <http://www.umich.edu/~elements/fogler&gurmen/html/asyLearn/bits/cstr/index.htm>

$$\frac{dN_i}{dt} = F_{i0} - F_i + V_{viri}$$

- F_i representa el flujo molar del reactivo i y está relacionado con el flujo volumétrico:

$$F_i = v * C_A$$

Si se supone que el sistema opera en estado estacionario, entonces el cambio de concentración sobre el tiempo tenderá a cero. Si el balance se hace en términos de conversión molar, tomando como un ejemplo una especie reaccionante B y se toma como coeficiente estequiométrico 1, el balance se reduce a:

$$F_{B0} - F_{B0}(1 - X_B) - (-r_B) = 0$$

- F_{B0} : Flujo molar del reactivo B a la entrada
- X_B : Conversión inicial de B
- $-r_B$: Velocidad de reacción de B

Para el balance de energía de este reactor tenemos la siguiente ecuación:

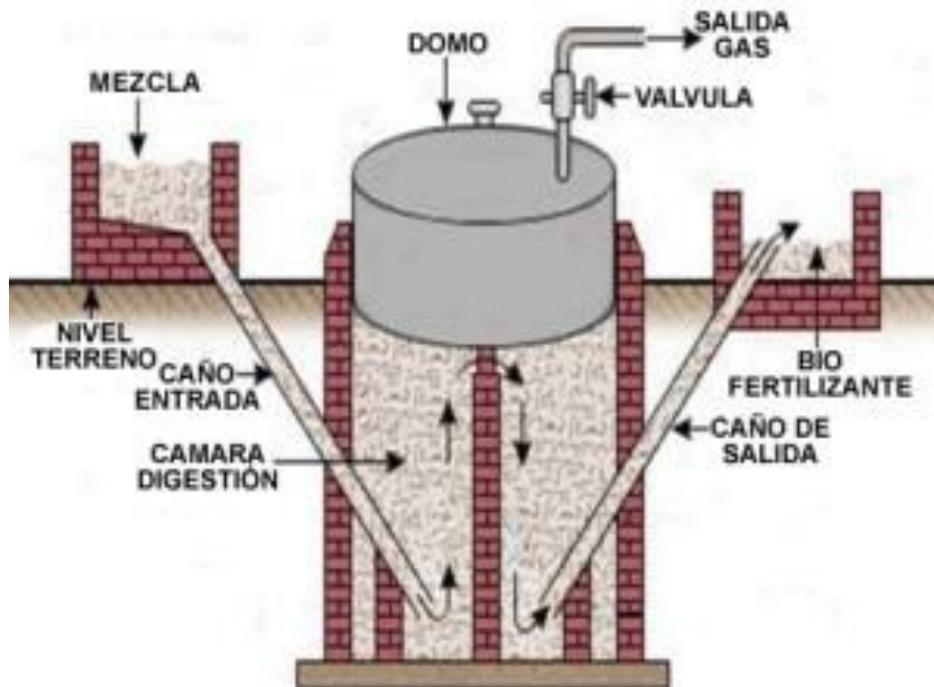
$$0 = \rho * C_p * \dot{V} * (T_{entrada} - T_{salida}) + U * A * (T_{servicio} - T_{reactor})$$

- ρ : Densidad de la mezcla reaccionante
- C_p : Capacidad calorífica
- \dot{V} : Flujo volumétrico
- U : Calor exotérmico de reacción
- A : Área de transferencia de calor

1.3.2 Sistemas Semi – Continuos. Este tipo de biodigestor es el más común en áreas rurales o para pequeños agricultores de uso doméstico, los diseños más populares son el tipo hindú y el tipo chino. El diseño que presenta el reactor tipo hindú es vertical y se encuentran enterrados para poder ser cargados por la gravedad, y producir cantidades de biogás constantes, esto depende del tiempo de fermentación que haya tenido el material a usar. Este tipo de diseño almacena el gas en la parte superior del pozo formando así una campana flotante, su eficiencia está alrededor de los 0.5 – 1 m³ de biogás / m³ de digestor al día²⁷.

²⁷ SOLUCIONES PRÁCTICAS ITDG. Ficha técnica biodigestores. p.1

Figura 6. Esquema biodigestor hindú

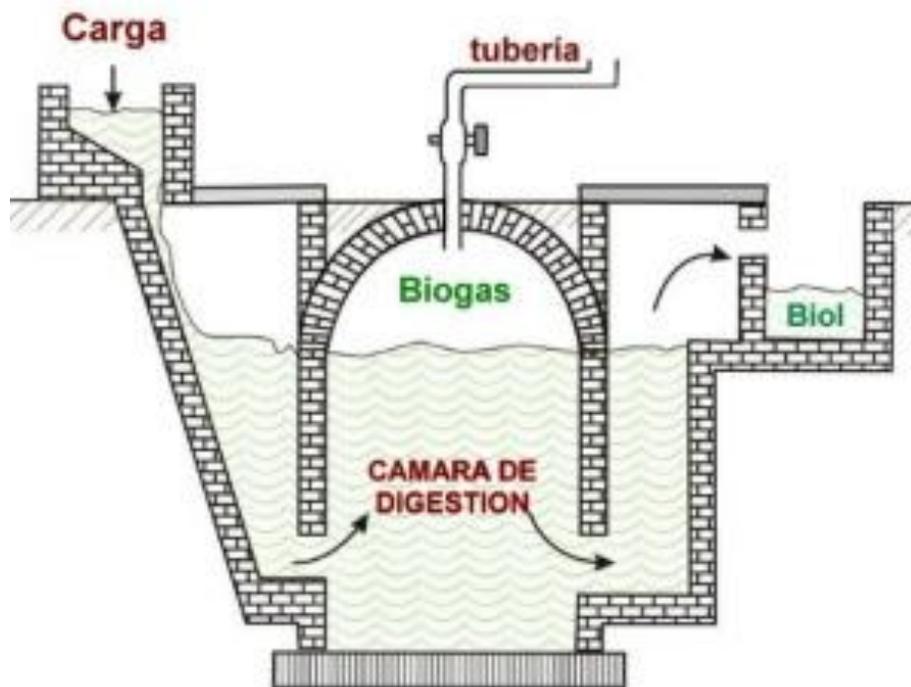


Fuente: ABOUTESPANOL. Tipo de biodigestores y sus diseños. 2016. Recuperado de: <https://www.aboutespanol.com/tipos-de-biodigestores-y-sus-disenos-3417696> el 7 de octubre de 2018.

Por otro lado el reactor conocido como chino, son tanques cilíndricos enterrados con una cúpula en la parte superior donde se acumula el gas, la eficiencia de este diseño es baja (entre $0.1 - 0.4 \text{ m}^3$ de biogás / m^3 de digestor), pero en THR producen buen abono para uso secundario²⁸.

²⁸ A. YAGUAL. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio prototipo de bajo costo, Trabajo de grado. Ingeniería Mecánica. Quito. Universidad San Francisco de Quito.2015. p43

Figura 7. Esquema biodigestor chino

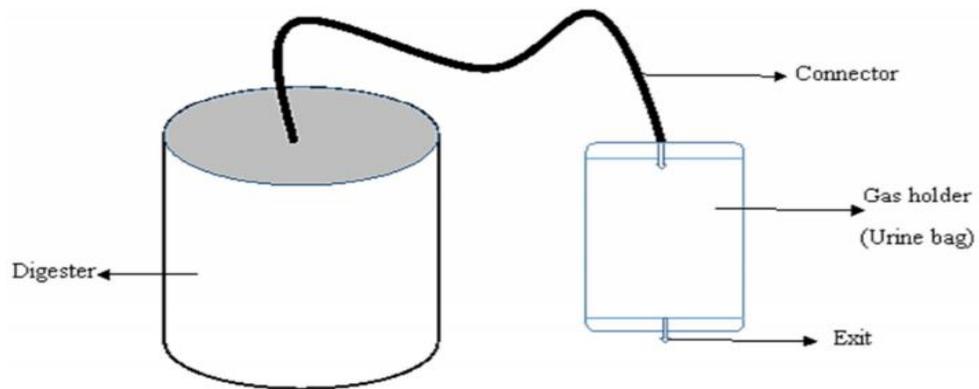


Fuente: WORDPRESS. Energía casera. 2009. [Blog]. [Consulta: el 7 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://energiacasera.wordpress.com/2009/09/17/clasificacion-de-biodigestores/>

1.3.3 Sistemas discontinuos. Este tipo de diseño es utilizado en plantas con poco personal o donde la materia orgánica es escasa, el reactor es cargado una sola vez y hasta el límite de su capacidad y es descargado una vez que la producción de biogás se termine, normalmente consiste de un tanque hermético con una salida de biogás. No requiere de atención continua y su producción está en el orden de 0.5 – 1 m³ de biogás / m³ de digester²⁹.

²⁹ G.SOLARI. Ficha técnica biodigestores. Lima. Universidad Alas Peruanas 2004.

Figura 8. Esquema digester batch



Fuente: ADEWOLE. I. Evaluating the biogas yield and design of a biodigester to generate cooking gas from human faeces. 2014

1.4 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM)

El PBM es un ensayo a escala de laboratorio que se realiza en un reactor, para determinar la biodegradabilidad anaerobia y la máxima producción de CH_4 de diferentes sustratos que pueden estar en forma líquida o principalmente sólida³⁰. Este ensayo consiste en mezclar un sustrato con un inóculo totalmente anaerobio en un ambiente experimental y con unas condiciones específicas, para que el CH_4 generado pueda ser cuantificado fácilmente.

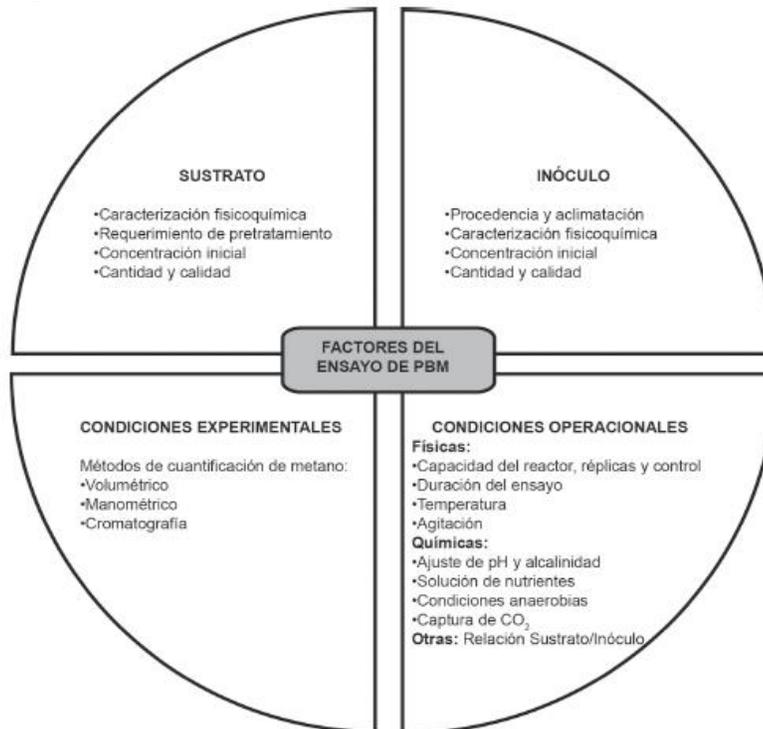
Este sistema no puede predecir en su totalidad reactores en escala real ya que las condiciones asignadas a este ensayo son totalmente controladas y manejadas, lo que no sucede en un reactor real, pero si puede ayudar a predecir teóricamente el funcionamiento de los digestores. La primera propuesta implementada para este ensayo fue desarrollada en 1979 por Owen et al en el cual era posible comprobar la cantidad de biodegradabilidad del inóculo durante unas condiciones de 30 días, analizando el efecto de la alcalinidad sobre el valor final de PBM³¹.

Esta metodología posee algunos factores que puede influir en los resultados de este, algunos de ellos son: sustrato, inóculo, condiciones de operación y el manejo de la parte experimental. En la siguiente figura se puede evidenciar más claramente estos factores fundamentales.

³⁰ LESTEUR M, BELLON-MAUREL V, GONZALEZ C, LATRILLE E, ROGER JM, JUNQUA G, et al. Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: a review. *Process Biochem.* 2010;45:431-40

³¹ OWEN WF. Et al. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Res.* 1979;13(6):485-92.

Figura 9. Factores que influyen en el ensayo de PBM.



Fuente: TORRES. P. et. al. Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano-PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. Revista ION. Vol.29 Num1. 2016

Generalmente para medir la producción de CH₄ dada por el ensayo PBM se utiliza la ecuación de Buswell, la cual se expresa comúnmente en mLCH₄/ gSV⁻¹ :

$$PBM_{teórico} \left(mLCH_4/gSV^{-1} \right) = \frac{22,4 \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8} \right) 1000}{12n + a + 16b + 14c}$$

Donde:

n: número de moles de carbono

a: número de moles de hidrógeno

b: número de moles de oxígeno

c: número de moles de nitrógeno

22,4: volumen (l) ocupado por un gas ideal a condiciones estándar de temperatura (273k) y presión (1atm)

1000: factor de conversión del volumen de L a mL

12, 1, 16, 14: peso molecular del carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, respectivamente.

1.5 BIOGÁS

El biogás es la mezcla de gases producido por la reacción de un conjunto de bacterias, entre esas las metanogénicas, que transforman la materia orgánica en un ambiente aislado de oxígeno, este gas es compuesto principalmente de 60 – 80% de metano, 30 – 40% de dióxido de carbono y trazas de otros gases, como ácido sulfhídrico, monóxido de carbono, nitrógeno e hidrógeno como se indica en la tabla a continuación.

Tabla 3. Características del biogás

Componente	Porcentaje	Características del metano	
Metano	60-80	Densidad	1.09 kg/m ³
Gas carbónico	30-40	Solubilidad en agua	Baja
Hidrogeno	5-10	Presión crítica	673.1 psia
Monóxido de carbono	0.1-5	Temperatura crítica	82.5 °C
Oxigeno	0.1	Poder calorífico	22400 kJ/m ³
Ácido sulfúrico	0-1		
Vapor de agua	0.3		
Nitrógeno	1-2		

Fuente: MONCAYO. G. Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás. 2008.

La cantidad de biogás producido depende de la cantidad y calidad de los sustratos utilizados; por ejemplo, las grasas producen 1.2-1.6 m³ / kg, las espumas 0.9-1.0 m³/kg, las proteínas y carbohidratos 0.7 m³ / kg, etc. los digestores anaeróbicos municipales producen metano con un rango de 0.75–1.0 m³ / kg de solidos volátiles (vs) degradados en condiciones mesofílicas. La producción de metano se puede

calcular en función de la DQO, dado que teóricamente 1 kg de DQO, produce 0,35 m³ de metano³².

En relación a la producción de biogás, esta oscila 1 – 2 m³ por cada m³ de biodigestor o 0,35 m³ de gas metano por kilogramo de DQO degradado³³. En términos más reales es muy difícil predecir con exactitud la cantidad de biogás que se vaya a producir en cualquier proyecto, esto se debe mayormente a que no se puede determinar en su totalidad la biomasa que un lodo residual contiene.

Durante este capítulo se habló de las generalidades de la producción de biogás a través de la digestión anaerobia y de los diversos reactores y parámetros necesarios para la producción de biogás, éstas generalidades servirán para la selección de las mejores condiciones de operación para la puesta en marcha de los reactores CSTR que fueron proporcionados por la Pontificia Universidad Javeriana, que serán comentados en el siguiente capítulo con el fin de poder cumplir con el primer objetivo específico y parte de los objetivos específicos 2 y 3.

³² SANTOSH, et al. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques. Bioresource Technology. 2004. 95, 1- 10

³³ A. YAGUAL. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio prototipo de bajo costo, Trabajo de grado. Ingeniería Mecánica. Quito. Universidad San Francisco de Quito.2015.

2. METODOLOGÍA

El proyecto constó de tres (3) objetivos específicos, que fueron de gran ayuda para poder desarrollar de forma organizada y eficaz el trabajo, el primer objetivo consistió en encontrar los parámetros adecuados para que los reactores tuvieran una buena estabilización y así mismo un buen proceso de producción de biogás, siguiente a esto, el segundo objetivo específico hacía referencia a realizar la caracterización física y química del lodo contenido en los reactores, para poder tener un seguimiento del comportamiento que estaban teniendo los microorganismos durante el proceso de la digestión anaerobia, por último se evaluó la calidad del biogás y su potencial energético teórico para poder cuantificar la carga energética que el proyecto estaba produciendo a partir de ese biogás .

Para la elaboración de una metodología fue necesario basarse en el marco teórico específicamente en los factores que influyen en la digestión anaerobia, los cuales eran las variables determinantes ya que si no se tenía un control sobre ellos podrían causar la inhibición del proceso. Debido a esto se tomaron muestras de laboratorio semanalmente los días martes y jueves y se creó una base de datos en Excel para tener un registro constante. En este capítulo se describió la manera en que fueron realizadas estas pruebas.

Para poder evaluar la cantidad y calidad de gas producido por los reactores, fue necesario implementar el método de análisis de gases por medio de un cromatógrafo Shimadzu, así mismo, se usó la ecuación Buswell para poder estimar la cantidad teórica de biogás que se podía producir.

2.1 DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS

Para la adecuación del sistema de digestión anaerobia primero se realizó un diagnóstico de los equipos con los que contaba la PUJ, así, la universidad contaba con dos reactores continuos de tanque agitado, que no estaban siendo usados, estos estaban hechos de vidrio sobre una estructura metálica, rematado en la parte de abajo por una base cónica con el fin de facilitar la recuperación de los lodos digestados, como se muestra en la ilustración 1:

Ilustración 1. Reactores CSTR provistos por la PUJ.



Fuente: elaboración propia.

Los reactores también contaban con chaquetas internas de calentamiento, mangueras para que el flujo de aceite consiguiera circular dentro de los reactores y una bomba de recirculación (ilustración 2) que ayudaba a transportar el aceite dentro de los reactores, todo esto con el fin de dar condiciones para trabajar un sistema adiabático dentro de los reactores.

Ilustración 2. Equipo de recirculación de aceite.



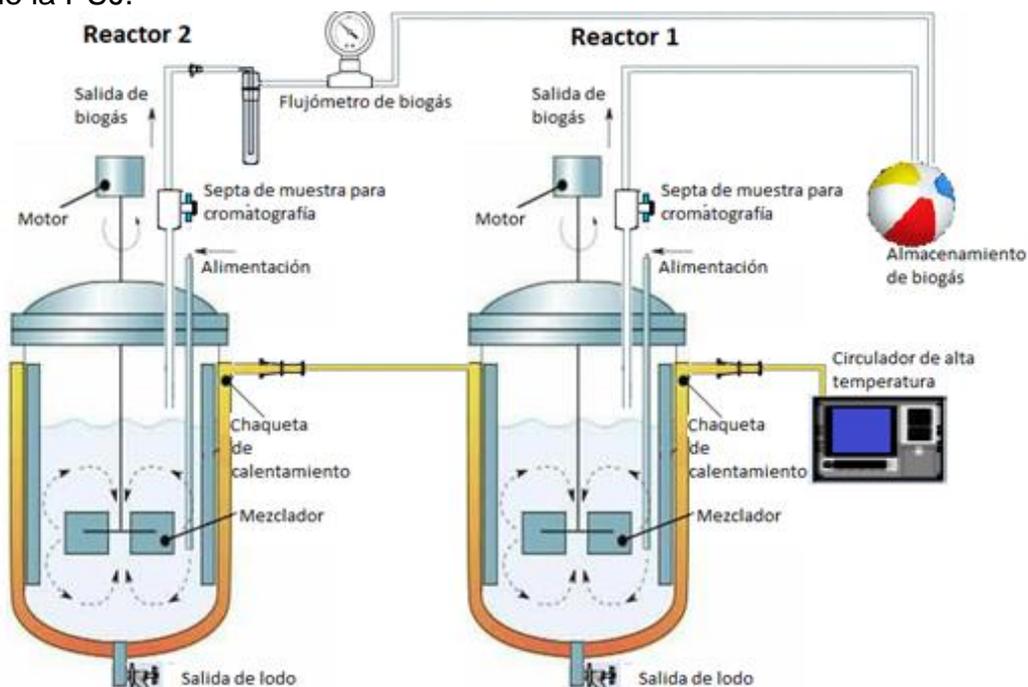
Fuente: elaboración propia.

Este sistema de reactores, tenía medidores de flujo conectados a los reactores y ubicados en la parte superior sobre el soporte metálico, también contaba de medidores de revoluciones por minuto para poder controlar la agitación con la que los reactores iban a funcionar, así mismo, contaban con medidores de temperatura para que no se presenciara demasiadas fluctuaciones que pudieran impedir el óptimo proceso de la digestión anaerobia, y contaban también con un tapón de plástico en la base de la tapa por donde era posible alimentar los reactores.

Para poder medir el gas por medio de cromatografía los reactores cuentan con una vejiga de vidrio conectada directamente a la tapa del reactor y conectada directamente al medidor de flujo por medio de una manguera, esta vejiga contaba con válvulas de retención que ayudaban en el momento de la toma del gas para que no se presenciara escapes de gas y evitar errores en las mediciones.

La siguiente figura muestra la esquematización aproximada de los reactores CSTR provistos por la Pontificia Universidad Javeriana:

Figura 10. Reactores CSTR esquematización aproximada de los reactores de la PUJ.



Fuente: elaboración propia.

Los equipos usados en el sistema descrito anteriormente fueron los siguientes:

Cuadro 1. Equipos usados en el sistema de reactores.

Equipos	Descripción	Unidades
Reactores de vidrio	Capacidad: 20 Litros Material: 3.3 vidrio borosilicato de alta calidad Dimensiones(L*W*H):50cmx50cmx100cm	2
Chaquetas de calentamiento	Diámetro: mm/Volumen: 5L Incluidas en los reactores Rango de temperatura: -60 a 200°C	2
Estructura metálica	Soporte de los reactores Material: Acero inoxidable 304 y aluminio recubierto	2
Bomba recirculadora de aceite de alta temperatura	Máxima temperatura: 300°C Fluctuaciones de temperatura: ± 0.2 grados Tamaño del tanque(cm): 86 x 48 x 59 Flujo(L/min): 8	1

Cuadro 1 (Continuación)

Equipos	Descripción	Unidades
Medidor electrónico de agitación (rpm) y de temperatura (°C)	Semiautomático	2
Mangueras de silicona	Mangueras de circulación de aceite	2
	Mangueras de circulación de biogás	2
Balón de piscina	Diámetro:42cm Volumen:38800cm ³ -a 1 atm	1
Flujómetro de gas	Rango de error ± 0.2-0.5%	1
Sistema de agitación	Motor eléctrico de agitación: Potencia. 120W Fuente de alimentación: 600RPM	2
	Paletas mezcladoras	2

Fuente: elaboración propia

2.2 ESTABILIZACION DE LOS REACTORES

Realizado el diagnóstico o descripción de los equipos, se procedió a realizar la estabilización de los reactores para obtener una producción de biogás medianamente estable, para ello, fue necesario realizar una revisión bibliográfica que sirvió como base guía para seleccionar los parámetros correctos de operación en los reactores. Los parámetros objetivos para esta estabilización fueron las temperaturas, pH, velocidad de agitación, alimento y tiempo de mezcla, de la bibliografía se pudo obtener las siguientes condiciones:

Tabla 4. Variables fijas de operación.

pH	Rango de 6.5-7.5
Temperatura (°C)	Rango de 37°C-39°C
Agitación	90 rpm
Tiempo de mezcla	40-70 días

Fuente: elaboración propia

Fijadas estas variables se procedió a usar como inóculo los lodos primarios obtenidos por la PTAR, los cuales, se introdujeron en los dos reactores continuos de tanque agitado durante 2 meses, este lodo primario era alimentado diariamente con el mismo lodo para mantener un volumen de 15L del total de 20L de capacidad del reactor, este volumen era mantenido en estas cantidades gracias a que se le retiraba 500mL diariamente.

Luego de un tiempo de 2 meses se observó que al suministrar el mismo lodo como alimento generaba un aumento de ST impidiendo el funcionamiento en la agitación del reactor, lo que provocaba una baja homogenización y un mal funcionamiento del proceso. Por esta razón, fue necesario buscar otra alternativa como fuente de alimento, para esto, la bibliografía mencionaba unas cantidades de macro y micronutrientes que servían como fuente de alimento para los lodos primarios. Con respecto a los micronutrientes, las cantidades y las composiciones escogidas fueron en base a un artículo de la universidad de Stanford³⁴, y con respecto al macronutriente utilizado, se escogió el almidón de maíz ya que era un producto muy asequible y con porcentajes considerables de carbohidratos, lípidos y proteínas, esta decisión fue tomada en base a una tesis donde implementaban el almidón de maíz para aumentar los nutrientes en los lodos³⁵.

Diariamente se alimentó los reactores con la mezcla ya mencionada, que contenía 25g de macronutriente el cual aportaba 10.125% de carbohidratos, 13.978% de proteínas y 15.974% de lípidos, estos cálculos se hicieron con base a la tabla nutricional que contenía el almidón de maíz (Maizena) y con respecto a los rangos de la tabla 6.

Tabla 5. Características de los macronutrientes de los lodos en sus distintas etapas.

Características de los lodos			
	Primarios	Secundario	Digeridos
Lípidos %	12-16	3-5	4-12
Proteínas %	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos %	8-10	6-8	5-8

Fuente: TORRES CARRANZA E. Reutilización de aguas y lodos residuales.

³⁴ OWEN et al. bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity, 19 Diciembre, 1979.

³⁵ RUIZ SALDAÑA A. P. Y QUEVEDO MOSCOSO L. A. análisis de los lodos provenientes del proceso de tratamiento de aguas residuales del municipio de guatavita, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C, 2017.

También contenía 83.6025g de micronutriente que era preparada como disolución en 1000 mL H₂O que se creía iba a favorecer el crecimiento microbiano y la producción de biogás, todos estos cálculos fueron basados en un volumen de reactor de 15L, dando como resultado la siguiente tabla:

Figura 11. Cantidades máxicas de micronutrientes para concentraciones de 15L.

	COMPUESTOS	UNIDADES	CONCENTRACIÓN (15L)
MICRONUTRIENTES	NH ₄ Cl	g	3
	KCl	g	1.5
	MgCl ₂ ·6H ₂ O	g	9
	KH ₂ PO ₄	g	2.07
	FeCl ₃ ·6H ₂ O	g	3
	MnCl ₂ ·4H ₂ O	g	0.06
	CoCl ₂ ·6H ₂ O	g	0.15
	NiCl ₂ ·H ₂ O	g	0.15
	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	g	0.0075
	CuCl ₂ ·2H ₂ O	g	0.0075
	CaCl ₂ ·2H ₂ O	g	1.5
	KI	g	0.15
	H ₃ BO ₃	g	0.0075
	NaHCO ₃	g	63

Fuente: elaboración propia basado en OWEN W.F, et al. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. Water Research. Vol.13. Número 6. Estados Unidos.1979.

Diariamente se alimentaba los reactores, exceptuando los fines de semana, donde se observaban producciones similares, y donde el volumen del gas obtenido era cuantificado a través de medidores de flujo con un rango de error de ± 0.2-0.5% (ilustración 3) que estaban conectados directamente a los reactores. Durante los primeros meses de estabilización, se presentó una falla en el medidor de R1, lo que hizo necesario cambiar este equipo por un montaje más artesanal, esta estructura consistía de un balón de piscina con un diámetro de 42cm y un volumen aproximado de 38800 cm³, conectado a una manguera que salía del reactor, para cuantificar el volumen de este, era necesario desconectar el medidor del R2 y tomar valores

iniciales cada vez que se hacia este proceso, así, de esta manera se logró medir los valores en volumen de biogás de ambos reactores,

Ilustración 3. Medidor de flujo de gas



Fuente: SHANGHAI YINUO INSTRUMENT CO., LTD. Medidor de Flujo. 2017. [Consultado: 2 de septiembre de 2018]. Disponible en: https://es.made-in-china.com/co_shyinuo/

Luego de 3 meses de estar usando el alimento anteriormente mencionado se decidió implementar una nueva mezcla de macro y micronutrientes para verificar si presentaba o no cambios positivos o negativos en la generación de biogás, pero transcurridos unos días de esto, se vio la necesidad de no generar un shock en los reactores que pudiera afectar la estabilidad de estos, por tanto, fue necesario dejar la misma mezcla de micronutrientes y solo cambiar el componente de macronutriente, para esto se escogieron compuestos como glucosa, celulosa, caseína, acetato de sodio y aceite de cocina, teniendo cada uno componentes con una alta cantidad másica de carbohidratos, proteínas y lípidos, que ayudan con el proceso de digestión anaerobia. Los datos para estos macronutrientes fueron seleccionados a partir de los requerimientos nutricionales microbianos y la complejidad de cada sustrato, con ayuda de una investigación que realiza la Pontificia Universidad Católica de Chile. Estos datos fueron suministrados por un investigador en esa universidad y ayudaron en la elaboración de los cálculos para un volumen de 15L como se muestra en la siguiente tabla:

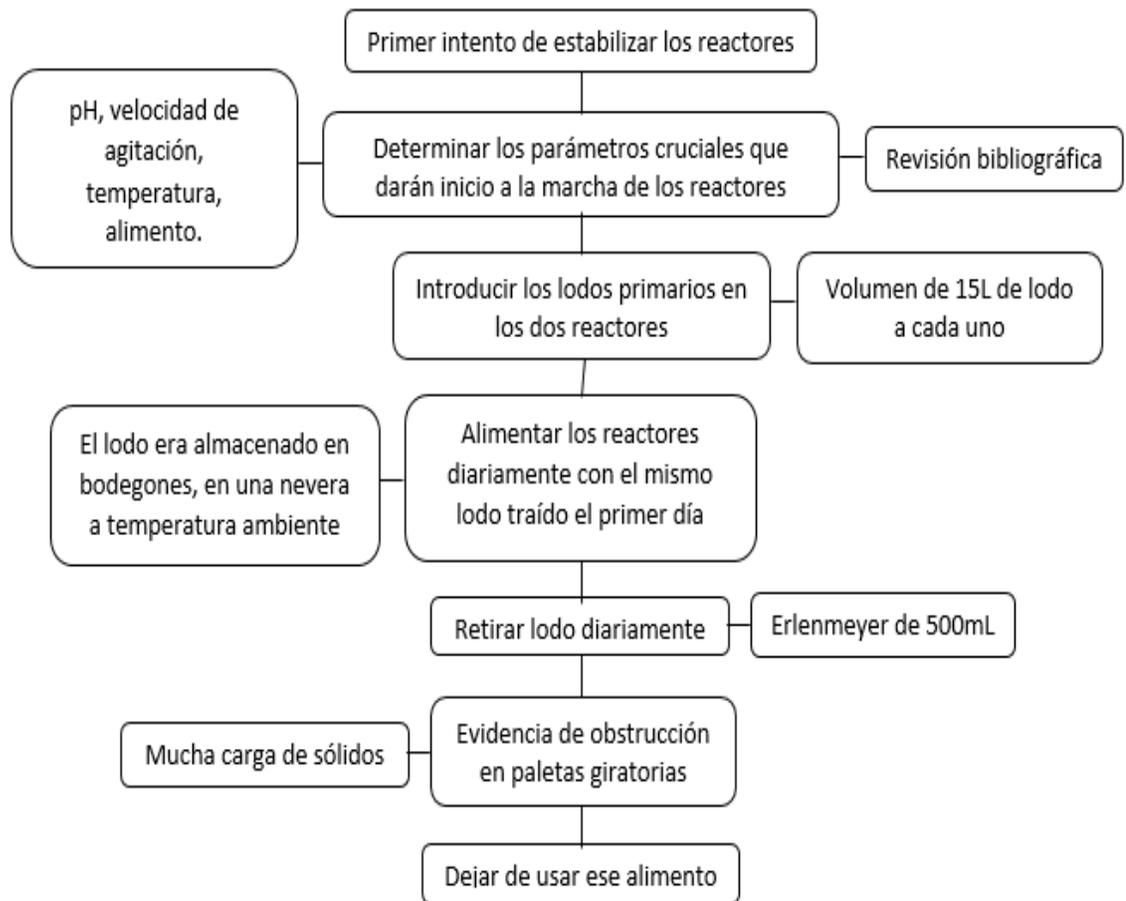
Tabla 6. Cantidades másica de macronutrientes para una concentración de 15L.

	COMPUESTOS	UNIDADES	CONCENTRACIÓN (15L)
MACRONUTRIENTES	Glucosa	g	0.1
	Celulosa	g	0.1
	Caseína	g	0.1
	Acetato de sodio	g	0.1
	Aceite de cocina	mL	0.1

Fuente: elaboración propia

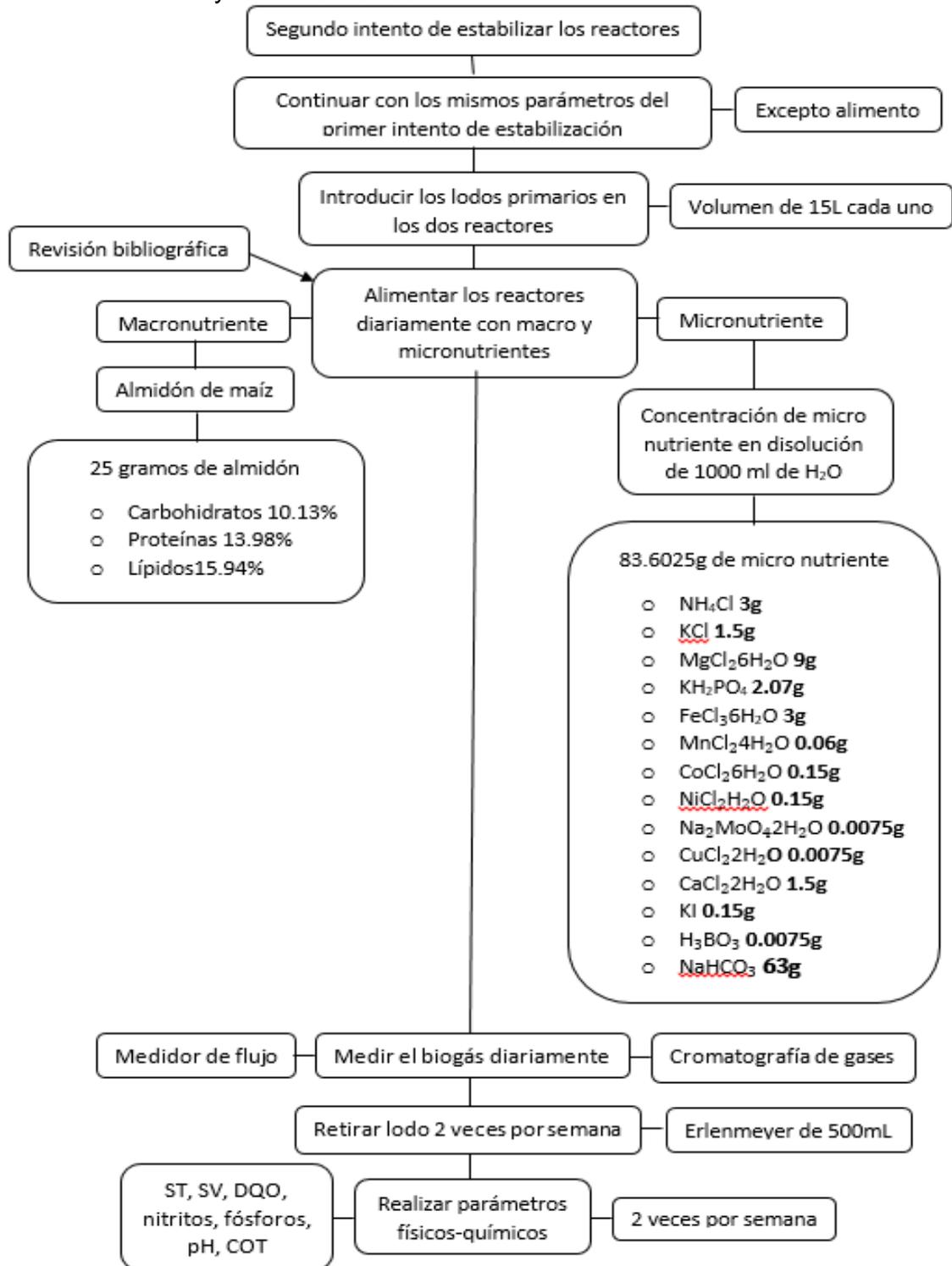
A continuación, se mostrará a través de diagrama de flujo el proceso de estabilización de los reactores usando los dos tipos de alimentos mencionados anteriormente:

Diagrama 1. Esquema del procedimiento para la estabilización de los reactores con alimento de lodo primario. (Prueba)



Fuente: elaboración propia.

Diagrama 2. Esquema del procedimiento para la estabilización de los reactores con alimento de macro y micronutrientes



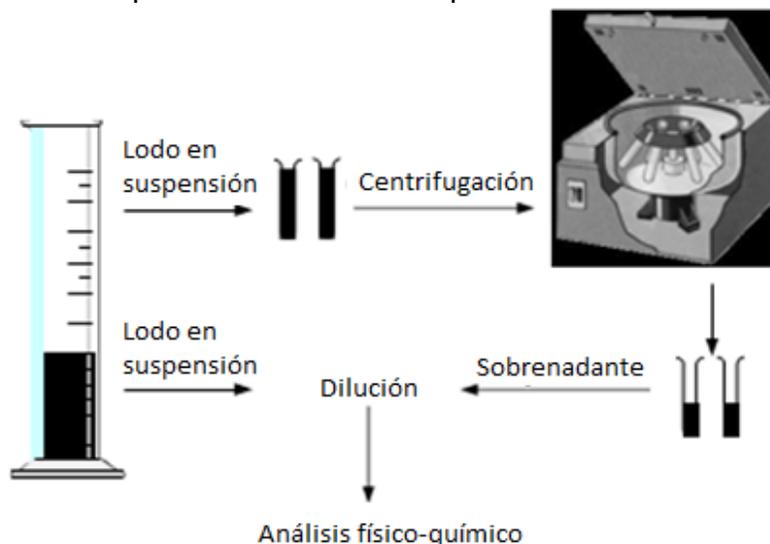
Fuente: elaboración propia.

2.3 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE LOS LODOS DIGESTADOS

Definidas las condiciones en que se operaban y se alimentaban los reactores, se procede a la caracterización para los lodos activados que se encontraban en los reactores, se monitoreó no solo la producción de biogás sino también de parámetros físico-químicos tales como el pH, la temperatura, los sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), nitritos, fósforos, la demanda química de oxígeno (DQO), que serán descritos a continuación.

2.3.1 Toma de muestras. Dos veces a la semana, se hacían los análisis físico-químicos, para ello se tomaban dos beakers, en los cuales se depositaban entre 300-500mL de muestra, marcados con R1 y R2, que correspondían al lodo que se sacaba del reactor 1 y del reactor 2, respectivamente, así mismo, también se tomaban otros dos beakers, donde se depositaba muestra del lodo anteriormente sacado de los reactores y que posteriormente habían sido centrifugados, en el cual, para este procedimiento, se llenaba con muestra en 8 tubos de ensayo de 13mL c/u, siendo 4 tubos para cada reactor, estos eran introducidos en una centrifugadora Sigma a 40 rpm durante 35 minutos para obtener la decantación de este material, como se puede ver en la figura 12, para así posteriormente realizar los distintos análisis físico-químicos.

Figura 12. Representación esquemática del tratamiento preliminar para el análisis físico-químico.

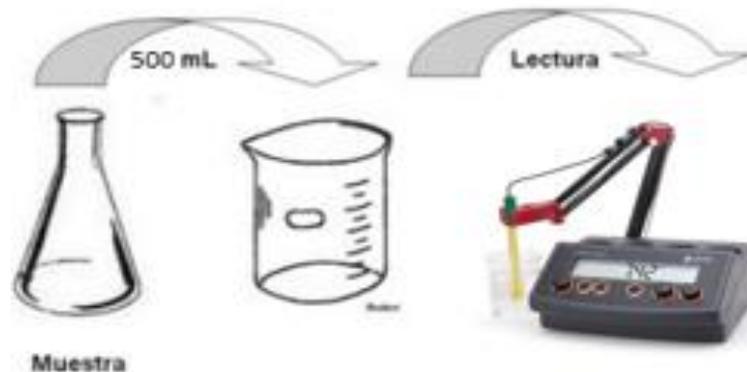


Fuente: elaboración propia basado en ASTOLFO CELIS Crispin. Improvement of anaerobic digestion by using of microaerobic conditions. Institute of Chemical Technology. Praga. República Checa. 2012.

2.3.2 pH y Temperatura. Luego de realizar los procesos descritos anteriormente, era importante dirigirse a medir el pH a través de un equipo electrónico llamado pHmetro (Fig. 13), ya que este parámetro puede favorecer o no el metabolismo de crecimiento de las bacterias, como se evidencia en el ANEXO A, para esto, se debía realizar la calibración de este equipo antes de ser usado para que los resultados fueran los más adecuados, el valor medible debía estar en un rango de 6.2 a 8.2, ya que es el rango donde las bacterias metanogénicas pueden trabajar de manera óptima como se muestra en la tabla 2 , estas lecturas fueron realizadas dos veces por semana para asegurarnos de que nuestro inoculo no sufriera cambios bruscos o tuviera algún inconveniente que no dejara generar el biogás deseado.

Para las mediciones de la temperatura se contaba con un sistema electrónico de alta gama unido a los reactores que ayudaban a mantener la temperatura en un rango de 37 °C - 39°C, pero aun así se medía la temperatura de los lodos que eran retirados del reactor con un termómetro convencional punta de mercurio.

Figura 13. Representación esquemática de la lectura del pH de las muestras.



Fuente: elaboración propia.

2.3.3 Determinación de los sólidos. Para el análisis de los sólidos fijos, totales y volátiles, primero se pesaban cuatro crisoles en una balanza digital, con el fin de obtener el dato del “peso de crisol vacío”, estas fueron enumeradas 1, 2, 3 y 4; este parámetro se midió de acuerdo con métodos estándar 2540 BG de la Asociación Americana de Salud Pública³⁶.

Los crisoles “1” y “2”, corresponderían a las muestras tomadas directamente de los reactores, mientras que “3” y “4”, corresponderían a las muestras centrifugadas. Posteriormente se tomaron cuatro muestras en pipetas de 10ml cada una, siendo las 2 primeras pipetas lodos sin ningún tipo de tratamiento previo y las otras dos

³⁶ AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Et al. Método estándar 2540. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21 ed., 2005 New York.2012

últimas pipetas con lodos provenientes del proceso de centrifugación previamente explicado, luego de que todos los crisoles tuvieran el contenido a calcinar, estas fueron llevadas a una mufla donde se secarían las muestras de cada biorreactor a 110 °C por 3 horas, para poder identificar la cantidad de sólidos totales que contenían cada una de las muestras. Las fórmulas utilizadas para este método fueron las siguientes³⁷³⁸:

$$ST (mg/L) = \frac{(W_{110^{\circ}C} - W_{crisol\ vacio}) * 1000}{Volumen\ de\ muestra}$$

$$\%ST = \frac{(W_{110^{\circ}C} - W_{crisol\ vacio}) * 100}{W_{Crisol\ muestra} - W_{crisol\ vacio}}$$

Para poder determinar los sólidos volátiles que contenían nuestros 4 crisoles, era necesario someter las muestras a una temperatura más elevada, fue por esto que las muestras fueron llevadas de nuevo a la mufla a una temperatura de 500°C por otras 3 horas, luego de que este tiempo transcurriera los crisoles eran pesados en una balanza digital y con ayuda de la formula obtenida de la bibliografía³⁹ fue posible identificar los SV del proceso. Este procedimiento era realizado regularmente los días martes y jueves durante un aproximado de 4 meses. Fórmula de sólidos volátiles en porcentaje y mg/L:

$$SV (mg/L) = \frac{(W_{110^{\circ}C} - W_{500^{\circ}C}) * 1000}{Volumen\ de\ muestra}$$

$$\%SV = \frac{(W_{110^{\circ}C} - W_{500^{\circ}C}) * 100}{W_{Crisol\ muestra} - W_{crisol\ vacio}}$$

Para la obtención de los sólidos fijos y la humedad se usaron las fórmulas encontradas en el ANEXO C.

2.3.4 Demanda química de oxígeno (DQO). El DQO es una medición del contenido de materia orgánica y compuestos oxidables en una muestra, mide la cantidad de sustancias que pueden ser susceptibles a ser oxidadas por medios químicos que hay suspendidos en una muestra líquida y se expresa mediante (mgO₂/L). Para este parámetro se usó el equipo HANNA (Fig. 13).

³⁷ SYMONS, G.E. & B. MOREY. The effect of drying time on the determination of solids in sewage and sewage sludges. Sewage Works J. 13:936. 1941.

³⁸ GRATTEAU, J.C. & R.I. DICK. Activated sludge suspended solids determinations. Water Sewage Works 115:468. 1968.

³⁹ GOODMAN, B.L. Processing thickened sludge with chemical conditioners. Pages 78 et seq. in Sludge Concentration, Filtration and Incineration. Univ. Michigan Continued Education Ser. No. 113, Ann Arbor. 1964.

Figura 14. Reactor COD HANNA.



Fuente: HANNA. [Catálogo].
[Consultado: 6 de agosto de 2018]. Disponible en:
http://www.hannaarg.com/products.php?accion=mostrar_categoria&id_categorias=706

La preparación de este parámetro consistía en tomar 5 viales de solución DQO rango alto (DQO HR), tales como los mostrados en la ilustración 6, donde se ingresaban 0,2 mL de muestra, que fueron repartidos de la siguiente manera, para el vial 1, se utilizaba agua tipo I, ya que este iba a ser usado como blanco para la medición de las otras muestras, para los viales 2 y 3, era necesario diluir las muestras en balones aforados de 50mL ya estas excedían el rango de capacidad de lectura del instrumento, esta dilución se realizaba en cada uno de los balones aforados, introduciendo 1mL de lodo (R1 y R2, respectivamente) y se llevaba al aforo con agua destilada, por último, para los viales 4 y 5, se introducía el líquido sobrenadante de la decantación del reactor 1 y del reactor 2, respectivamente.

La digestión en el equipo COD, consistía en primero dejar aumentar la temperatura del equipo a 105°C, durante algunos minutos, para luego de que estuvieran listas las muestras, se procediera a aumentar la temperatura nuevamente, pero ahora a 150°C, y así poder dejar las muestras en cada uno de los orificios que contiene el equipo, en digestión durante 2 horas.

Pasadas las 2 horas, se dejaban enfriar las muestras entre 15 a 30 minutos, y así, proceder a medir los viales gracias al método de DQO HR, que contenía el multiparámetro HANNA del laboratorio, para realizar la medición de este parámetro, se realizó poniendo el “blanco de muestra” o “cero” (vial 1) como punto de referencia y así, realizar la medición del DQO para los viales que contenían las muestras diluidas (viales 2 y 3) y centrifugadas (viales 4 y 5). En el anexo F se podrá ver el procedimiento de manera detallada.

Ilustración 4. Viales para obtención de DQO.



Fuente: elaboración propia.

2.3.5 Nitratos, nitritos y fósforos. Para el cálculo de cada uno de estos parámetros se usaron las muestras contenidas en los beakers nombrados anteriormente, los cuales fue necesario realizar disoluciones con el objetivo de que el instrumento pudiera realizar las lecturas correspondientes, ya que la carga de sólidos de los lodos tratados era elevada lo que no permitía la lectura correspondiente. En el Anexo E se describirá paso a paso, como se hizo cada uno de estos parámetros, para un mejor entendimiento.

2.3.5.1 Nitratos. Para este parámetro se hizo uso del multiparámetro HANNA, seleccionando el método “Nitrato”. Inicialmente el cálculo de nitratos se realizó solamente para las muestras centrifugadas de los lodos de ambos reactores (R1* y R2*), debido a que las muestras de lodo tomadas directamente de los reactores y disueltas en balones aforados en una proporción de 1/1000mL (R1 y R2) presentaban un resultado que excedía el rango de lectura del instrumento.

El procedimiento para los nitratos fue el siguiente; se tomaban 6 mL de la muestra sin ningún agente químico para que este pudiera actuar como blanco o cero, y se ingresaban en los viales dispuestos para este equipo, y así se ingresaba el vial en el equipo y se oprimía el botón del “cero”, luego de ser medido, se retiraba el vial del equipo y a esta muestra se le incorpora un activador químico llamado “Reagente nitrato”, para que este pudiera reaccionar con la muestra, y nuevamente se ingresaba en el equipo, se oprimía el botón de “crono”, y se dejaba actuar el equipo, el procedimiento duraba 5 minutos y arrojaba datos de los nitratos (NO_3^- y NO_2^-N).

Este parámetro después de algunas mediciones procedió a dejar de usarse, debido a que en los diversos experimentos realizados dejó de funcionar ya que tanto las muestras centrifugadas como las de los lodos disueltos, estaban fuera del rango del equipo.

2.3.5.2 Nitritos. Para el cálculo de los nitritos, se realizaban las pruebas para las cuatro muestras ya nombradas anteriormente (R1*, R2*, R1 y R2), haciendo uso del multiparámetro HANNA, seleccionando el método de nitritos de rango alto (Nitritos HR).

Esta prueba contaba con un procedimiento similar al de los nitratos, los únicos cambios que se efectuaban eran la cantidad de muestra a tomar, pues en este caso la muestra que debía recolectarse era de 10 mL, y también el reagente a utilizar, ya que se tomaba el blanco (muestra sin reagente) para cada muestra, que igualmente se medía en el equipo como en el anterior parámetro, y luego se introducía el “Reagente Nitrito HR” en esta muestra, donde se presentaba una reacción exotérmica, ya que al mezclar la muestra con el “Reagente nitrito HR”, esta se presentaba en forma efervescente, ocasionando un derrame de esta solución al momento de taparla, ya que la presión aumentaba, por tal razón, se debía tener mucho cuidado al realizar este procedimiento para no regar ningún mililitro de la muestra y no afectar así los resultados, para luego volver a ingresar el vial en el equipo y oprimir el botón de “crono”, la duración de este proceso era de 10 minutos por muestra y los datos que arrojaba eran NO_3^- , NO_2^-N y $NaNO_2$.

2.3.5.3 Fósforo. En este parámetro, se hacía uso del multiparámetro HANNA, seleccionando el método “Fósforo”. Al igual que en los nitritos, se tomaban 10mL de la muestra y se ingresaban en los viales, haciendo un cambio en el reagente a usar luego de medir el blanco de muestra (muestra sin reagente), ya que en este caso tenían que añadirse dos reagentes, uno era el reagente “Fósforo A”, que está en estado líquido y se añadían 10 gotas en cada muestra, luego de ello, se procedía a añadir el reagente “Fósforo B” que era un polvo similar a los reagentes de los anteriores parámetros medidos. En este proceso también se generaba efervescencia por lo cual había que tener mayor cuidado al agregar estos elementos, luego de agregados los dos agentes se ingresaba el vial, y se oprimía el botón de “crono”, el procedimiento tenía una duración de 5 minutos y arrojaba los datos de P , PO_4^{3-} y P_2O_5 .

2.3.6 Densidad. La densidad del lodo digerido se determinó volumétricamente por medio de un volumen conocido y el peso que representaba dicho volumen de lodo, siendo la densidad de 0.9430 g/mL. Este parámetro representa la cantidad de masa contenida por unidad de volumen; de acuerdo a los resultados el lodo digerido presenta un comportamiento similar al del agua por lo que la densidad es cercana a 1.

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{471.5g}{500mL}$$

Por otro lado, la densidad del lodo primario, proporcionado por una PTAR, se obtuvo por medio de fuentes bibliográficas encontrando así un valor de 1.001 g/mL.⁴⁰ La

⁴⁰ GUÍA PARA EL MANEJO, TRATAMIENTO Y DISPOSICION DE LODOS RESIDUALES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO MUNICIPALES, Comisión nacional del agua, diciembre, 2007

obtención de la densidad se hizo con el fin de lograr el valor aproximado en peso del lodo usado a lo largo del proceso.

2.4 ANALISIS DE CARBONO TOTAL (TOC)

Este método permite la identificación del carbono soluble tanto inorgánico como orgánico que contiene la muestra. Dicha determinación se realizó con un analizador de carbono Shimadzu modelo TOC-VCSH basado en la oxidación catalítica del carbono total (CT) presente en la muestra de CO_2 , el cual se detecta por espectrometría de infrarrojos. Esta oxidación es efectuada por medio de un horno que contiene un catalizador de platino situado sobre partículas de alúmina y junto con el gas conductor que actúa como agente oxidante (oxígeno). Por otro lado la determinación del carbono inorgánico (IC), la muestra, se hace burbujear junto al oxígeno por una dilución de ácido fosfórico al 20%, de modo que solo la fracción de CO_2 correspondiente al IC llega al detector espectrofotométrico de infrarrojos, permitiendo su cuantificación⁴¹.

Figura 15. Equipo TOC-VCSH.



Fuente: SHIMADZU. Equipo TOC-VCSH. [Consultado: 2 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.shimadzu.com/>

Para calcular el TOC el instrumento resta el CT con el CIT como lo muestra la figura.

Figura 16. Obtención del TOC (lar process analysers ag).



Fuente: DR. WERNER ARTS. BOD, COD, TOC and TOD – sum parameters in environmental analysis. [Consultado: 17 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.chemeurope.com/en/whitepapers/126405/bod-cod-toc-and-tod-sum-parameters-in-environmental-analysis.html>

⁴¹ GONZALEZ GRANADOS I. C., Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR, Universidad San Francisco de Quito, Tesis doctoral, Córdoba, 2015.

Para este procedimiento se realizó cuatro veces con lodos directamente de los reactores y lodos sometidos a una centrifugación explicada anteriormente, los resultados fueron mostrados en el Anexo I.

2.6 CROMATOGRAFÍA DE GASES

La cuantificación de la cantidad de gas producido es importante para predecir y medir la producción de metano esperado para un reactor, sin embargo, también se debe contar con la calidad de ese gas que se produce, para determinar qué tan factible es o no operar el proceso realizado. Por ello la cromatografía de gases es un buen método para identificar el contenido de metano en los experimentos realizados, para ello durante el transcurso del proyecto, se hizo el uso del equipo de cromatografía de gases GC-2010, Shimadzu (Fig. 17), con detector de conductividad térmica y de ionización de llama, proporcionado por la Pontificia Universidad Javeriana.

Figura 17. Cromatógrafo de gases GC-2010 (Shimadzu).



Fuente: SHIMADZU. High-end Gas Chromatograph. [Consultado: 2 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.shimadzu.com/>

El análisis de metano por cromatografía de gases fue realizado tanto para los dos reactores, como de los ensayos de BMP, por tanto, el seguimiento realizado para los dos reactores fue diario, mientras que, para los BMP, fue de los días en que se realizaba la medición por desplazamiento de volumen nombrada anteriormente.

Para realizar las mediciones por cromatografía, se hacía uso de una columna SH-RX5, con las siguientes características:

- Tipo: Capilar
- Longitud: 30m
- Diámetro interno: 0.25mm
- Máxima temperatura de uso: 350°C.

Por otro lado, para acondicionar el equipo el equipo se acondicionó a una temperatura de 200°C y el equipo a una temperatura de 40°C, también se aplicaba un tiempo de retención de 1.30 min por cada inyección de muestra, así mismo, se tuvo que realizar una curva de calibración con metano puro, con el fin de obtener el porcentaje de metano de cada muestra.

Así, luego de adecuado el equipo, se procedió a hacer lo siguiente; se usó una jeringa de 1mL, especial para la medición del gas, ya que la inyección debía hacerse manualmente y no automáticamente como estaba programado el equipo, a los reactores se les adecuaba con una septa en sus válvulas, con el fin de que se pudiera ingresar la aguja y succionar la muestra, para ello se tomaban muestras de 0.5 mL y de 1mL, tanto del reactor 1 como del reactor 2, entonces, se elegía el método para la medición del gas, se le daba un nombre a cada medición, se inyectaba en el cromatógrafo y se oprimía el botón de “Start”, se tenía que tener especial cuidado en la medición, porque la presión ejercida dentro del equipo, provocaba que la jeringa tendiera a desplazarse hacia arriba, lo que ocasionaba errores en la medición, por tanto, debía aplicarse una presión con el fin de que la aguja no se desplazara, esta se dejaba alrededor de 0.30 min en inyección y luego era retirada, para luego de aproximadamente 2 min, obtener los resultados de la medición, de los cuales fueron discutidos en el siguiente capítulo de análisis y resultados.

2.7 POTENCIAL TEORICO DE METANO (ECUACION DE BUSWELL)

Como los macronutrientes suministrados a los reactores contienen cantidades de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno los cuales indican que es posible realizar el potencial teórico de metano, se pudo encontrar un valor aproximado de su producción, para esto se realizó una sumatoria de cada componente para tener la cantidad de carga total de estos componentes en el alimento, esto se hizo de la siguiente manera:

Tabla 7. Sumatoria de compuestos inorgánicos para ecuación de Buswell.

Macronutrientes	Carbonos	Hidrógenos	Oxígeno	Nitrógeno
Celulosa	120	200	100	0
Glucosa	6	12	6	0
Caseína	81	125	39	22
Acetato de sodio	2	3	2	0
Aceite de cocina	18	34	2	0

Fuente: elaboración propia.

Donde las letras a, b, c y d se encuentran especificadas en el numeral 1.2 del capítulo anterior.

$$Y_{CH_4 \text{ teorico}} = \frac{(4a + b - 2c - 3d) * 22.4 * 1000}{(12a + b + 16c + 14d)}$$

$$Y_{CH_4 \text{ teorico}} = \frac{(114.75) * 22.4 * 1000}{5790}$$

$$Y_{CH_4 \text{ teorico}} = \frac{25704000}{5790}$$

$$Y_{CH_4 \text{ teorico}} = 443.9378 \frac{ml CH_4}{g SV}$$

El potencial teórico fue desarrollado por medio de la ecuación de Buswell, el cual brindó una predicción del rendimiento del metano, fundamentándose en la descomposición del sustrato, este modelo no pretende simular el proceso cinético de la digestión anaerobia, sino que procura estimar la aplicabilidad del proceso a un sustrato específico y brindar la información necesaria para la toma de decisiones. El potencial teórico de metano obtenido fue de 443.9378 $\frac{ml CH_4}{g SV}$ este dato fue hallado gracias a que se conocía la materia orgánica ingresada a los reactores, estimando la cantidad de metano que podía producir basado en la estequiometría de la reacción.

Esta ecuación considera que todo el contenido de materia orgánica presente en el sustrato es biodegradable y se convierte totalmente en CH₄⁴², lo cual no es cierto en condiciones reales, ya que el sustrato puede contener materia orgánica no biodegradable y adicionalmente el CH₄ no es el único subproducto, debido a que parte de la materia orgánica se emplea para la formación de nueva biomasa aproximadamente de 10%. De esta manera, el valor del potencial de metano teórico sobreestima la producción real que se obtiene de forma experimental; sin embargo, este valor proporciona una aproximación a la producción de CH₄ que podría obtenerse del sustrato⁴³.

Por medio de la metodología mostrada anteriormente se logró cumplir tanto el primer como el segundo objetivo específico propuesto en este proyecto, los cuales eran definir las condiciones de operación y de realizar un análisis físico-químico a todos los parámetros seleccionados anteriormente que pudieran afectar de alguna manera la producción de biogás que sería cuantificada y analizada en el siguiente capítulo.

⁴² LESTEUR M, BELLON-MAUREL V, GONZALEZ C, LATRILLE E, ROGER JM, JUNQUA G, et al. Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: a review. Process Biochem. 2010; 45:431-40.

⁴³ CÁRDENAS CLEVES L. M. et al. Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. 2016

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

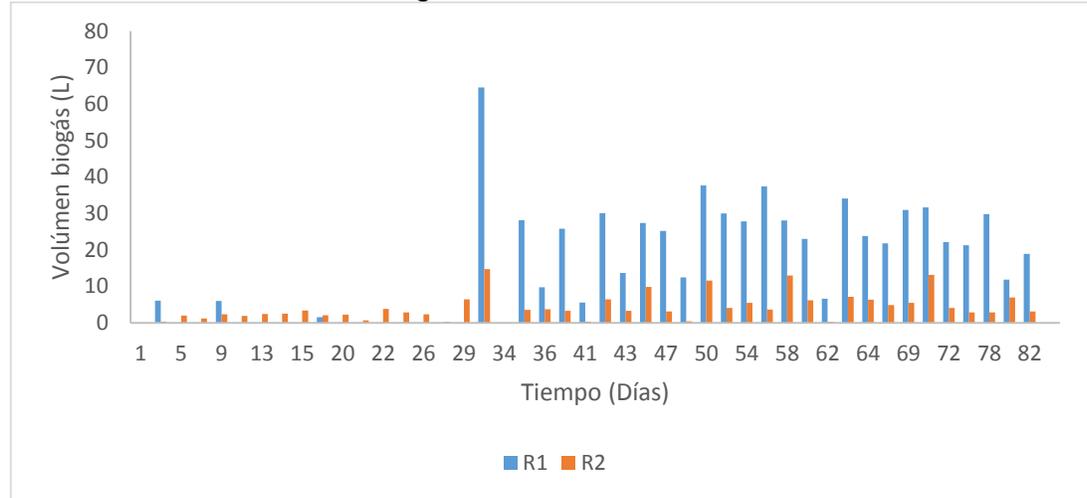
En este capítulo se encontrarán los resultados de los procedimientos anteriormente mencionados, para ello se compararon con diversas fuentes bibliográficas, con el fin de enriquecer el análisis de cada parámetro medido durante el proyecto

Por otro lado, se podrá encontrar cuál fue la importancia de elegir entre los sustratos usados para alimentar el lodo primario, es decir, cuál fue la incidencia de estos sustratos en la producción de biogás en los reactores CSTR, la duración del proyecto fue de aproximadamente 90 días en los cuales, si bien se presentaron problemas en la estabilización de los reactores como se mencionó en el anterior capítulo, pudo solventarse y se midieron las variables que afectan la producción de biogás, tales como el pH, la temperatura, la DQO, el seguimiento de sólidos fijos, totales y volátiles e igualmente de la producción cuantitativa y cualitativamente del biogás, por último se realizó el balance de materia correspondiente con el cual se llevó a cabo la aproximación de la producción total de biogás, esto con el fin de cumplir el tercer objetivo que era el de evaluar la calidad del gas y su potencial energético teórico.

3.1 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

La producción de biogás obtenida durante las diferentes etapas de experimentación se puede observar en la gráfica 1. Al realizar una comparación de los volúmenes de producción de ambos reactores, se puede observar que el reactor 1 (R1) tuvo problemas en arranque, esto fue debido a problemas técnicos de acondicionamiento presentados inicialmente como problemas en el acondicionamiento de la temperatura y daños en el flujómetro recolector de biogás, pero luego del acondicionamiento del reactor (alrededor de 30 días), este reactor incrementó la producción del biogás en cantidades similares a las del reactor 2 (R2), logrando una producción constante para ambos reactores con una calidad cercana al 40% en metano.

Gráfica 1. Producción de biogás.



Fuente: elaboración propia.

El biogás obtenido si bien no es de una alta calidad, es un gas con un porcentaje considerable de metano, característico de un arranque de biorreactor anaerobio. El metano fue medido a través de cromatografía de gases, con los procedimientos nombrados en el anterior capítulo, mediante una curva de calibración, que es una técnica de caracterización y fue realizada con gas del proveedor Cryogas (Metano = 60%, 40% CO₂), y calificada con la siguiente ecuación:

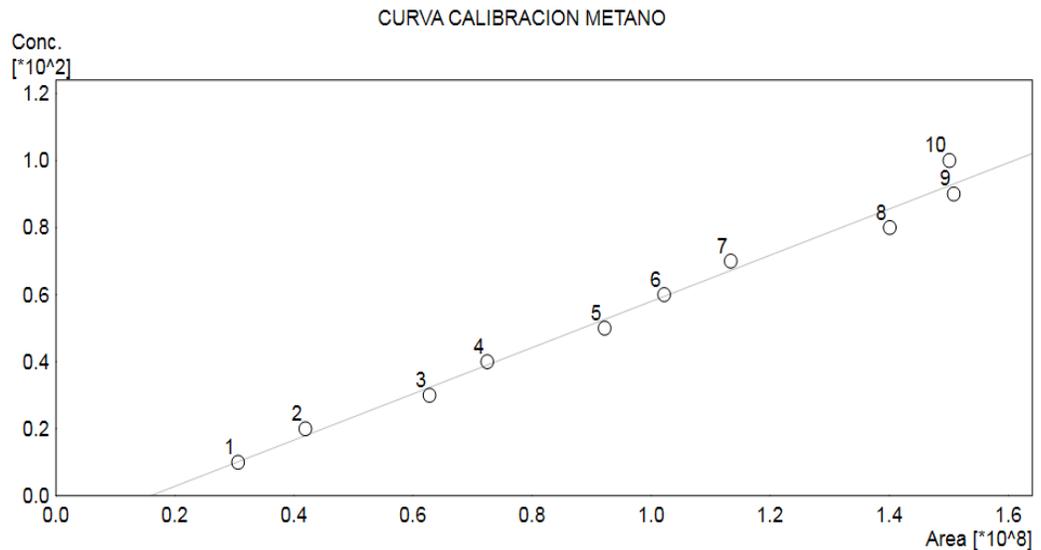
$$f(x) = 6.89563 * 10^{-7}x - 10.9609$$

Tabla 8. Datos curva de calibración.

Concentración Estándar (%v/v)	Área bajo la curva cromatográfica
10.134	30591908
17.953	41930276
32.316	62760037
39.014	72473433
52.617	92200772
59.507	102191371
67.212	113365996
85.641	140092029
93.062	150852810

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 2. Curva de calibración de metano puro.



Fuente: elaboración propia. Coeficiente de correlación de la curva ($r=0.9925659$).

La curva de calibración realizada, sirvió como base para el método realizado en el cromatógrafo a la hora de realizar las mediciones y gracias a ello, se pudo comparar los resultados obtenidos en cada inyección diaria, la cual se resume con algunos ejemplos en la siguiente tabla:

Tabla 9. Porcentaje de metano para los reactores 1 y 2 a diferentes días de operación.

Día	Fecha	Concentración metano % (Reactor 1)	Concentración metano % (Reactor 2)
1	8/21/2018	43	54
21	9/10/2018	31	30
65	10/18/2018	30	27
84	11/13/2018	34	28

Fuente: elaboración propia.

Al analizar el porcentaje de metano se puede observar que tanto el reactor 1 y el reactor 2, si bien tienen diferencias, ambos siguen una misma tendencia y es que empiezan con un buen porcentaje de metano, pero debido a la disminución en la carga oxidativa (DQO) disminuyó la producción de gas, por consiguiente la calidad del biogás también baja esto se presenta aproximadamente en el día 27. Posteriormente y alrededor del día 64 se aumentó la carga de alimento y el porcentaje de biogás aumenta, y vuelve a estabilizarse alrededor de un porcentaje del 30% hasta casi el fin de los experimentos como lo muestra la gráfica 1.

Al analizar los resultados de estos cambios o fluctuaciones en el porcentaje de metano, se puede inferir que ocurre lo propuesto por Pacheco González cuando afirma que “al observar una caída de DQO, aunque ha producido biogás puede indicar que la tasa de producción de metano se ha disminuido y puede ser debido a la baja solubilización de la DQO, como un resultado de la inhibición por los productos formados en la fase de hidrólisis/acidogénesis”⁴⁴

3.1.1 Análisis del biogás. Como anteriormente se explicó, en los resultados se halló la cantidad teórica de metano para el sustrato usado, en este caso lo que el lodo residual podía producir. Para poder verificar si nuestra materia prima producía o no una cantidad de CH₄ considerable se hizo una comparación de estos dos datos, esto se puede verificar en la siguiente tabla:

Tabla 10. Comparación metano experimental y metano teórico.

	Y _{CH₄} EXPERIMENTAL	Y _{CH₄} TEORICO
	mLCH ₄ / gSV	
R1	276.25	443.94
R2	208.14	443.94

Fuente: elaboración propia.

Al observar los datos presentados en la tabla 17 se deduce que el valor teórico dobló las cifras de producción que obtuvieron los reactores 1 y 2, mostrando así que a pesar de que se contaba con una producción de CH₄, este no era el más alto, indicando que la eficiencia en la conversión de metano asociada tanto al lodo residual y a la mezcla de macro y micro nutrientes como a los parámetros seleccionados para el reactor CSTR se debe mejorar. Para ello se le debe hacer seguimiento a posibles inhibidores como son el nitrógeno amoniacal, H₂, ácidos orgánicos volátiles y el H₂S, quienes su presencia en concentraciones medianamente altas inhiben la conversión a metano. También se tendría que evaluar el desempeño del reactor CSTR con respecto a otra relación inóculo-sustrato, dando a entender que el inóculo fue el mismo lodo primario, ya que en este proyecto se usó una relación de I:S de 1:2, o evaluar el pretratamiento del lodo residual y de esa manera mejorar el índice de biodegradabilidad.

Para mejorar estas cifras, también se necesita que tenga una degradación de sólidos volátiles de aproximadamente un 60% o mayor⁴⁵, y la degradación que se está obteniendo de esta clase de sólidos durante todo el desarrollo experimental correspondió a 15.85% para R1 y 20.81% para R2. Estos datos se muestran el

⁴⁴ PACHECO GONZÁLEZ, S.I. construcción y evaluación de un digester anaerobio para la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco. Universidad Nacional de Colombia. Manizalez. 2016 p.62

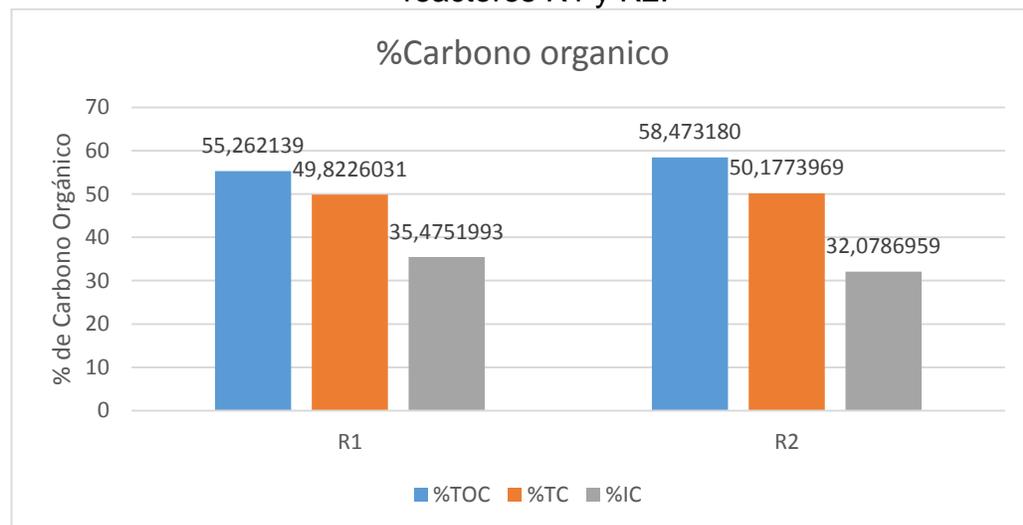
⁴⁵ NIZAMI, A. S., SINGH, A., & MURPHY, J. D. (2011). Design, commissioning, and start-up of a sequentially fed leach bed reactor complete with an Upflow anaerobic sludge blanket digesting grass silage. *Energy and Fuels*, 25(2), 823–834.

ANEXO C. Por otro lado la relación de C:N afecta directamente rendimiento de gas en forma constante durante la fermentación, en este caso, la relación que se manejo fue de 10,3:1, teniendo en cuenta que esta relación no era la más adecuada, ya que la relación que recomiendan Brown y sus colaboradores se encuentra en 20:1 o 30:1⁴⁶ siendo aceptable y siendo la mejor de 16:1⁴⁷. Para poder solucionar este problema es recomendable adicionar un co-sustrato con el alimento proporcionado inicialmente no solo para ayudar en el balance de esta relación sino también para reducir la inhibición de amonio generalmente encontrado en la digestión anaerobia.

3.2 REDUCCIÓN CARBONO ORGÁNICO

De acuerdo con la gráfica generada de los análisis de TOC en el ANEXO I, es importante observar que se alcanza una conversión del 58% en el reactor 2 y un 55% en el reactor 1, estos porcentajes fueron logrados mediante el proceso de digestión anaerobia debido a la biodegradabilidad de la fracción orgánica del residuo suministrado por la PTAR.

Gráfica 3. Reducción (%) de carbono orgánico en lodos residuales en los reactores R1 y R2.



Fuente: elaboración propia.

Este tipo de analisis proporciona informacion acerca de la capacidad que tiene el inoculo residual para suministrar compuestos organicos o biodegradables al

⁴⁶ BROWN, D., & LI, Y. (2013). Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. *Bioresource Technology*, 127, 275–280.

⁴⁷ CORACE, J.J.; AEBERHARD, M.R.; MARTINA, P.A.; VENTÍN, A.M.; GARCÍA S., E.; (2006). Comparación del tiempo de reacción en el proceso de biodigestión según el tamaño de las partículas de aserrín utilizado como materia orgánica. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas* 2006, Universidad Nacional del Nordeste, Resumen T-034, 4p

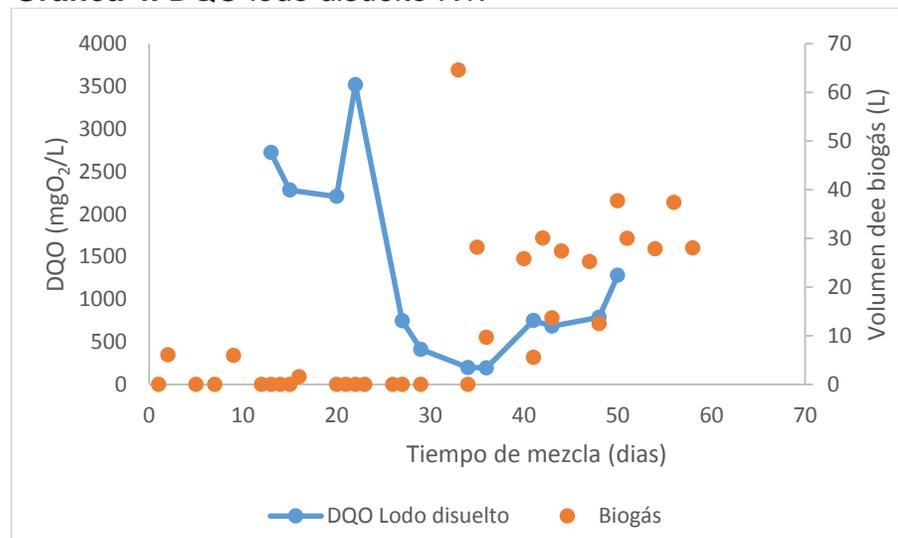
procesos que pueden contribuir a la producción de biogas o como fertilizante de suelos. Para poder usar este material residual en forma de fertilizante es necesario que los valores de carbono total oscilen en un rango de 15 a 55%.

La grafica 3 indica que el porcentaje de compuestos organicos que se encuentran en los reactores superan el 50% demostrando que los lodos residuales obtenidos por la PTAR contienen una carga organica optima para la biodegradacion y obtencion de biogas, asi mismo como para ser usando como biofertilizantes.

3.3 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

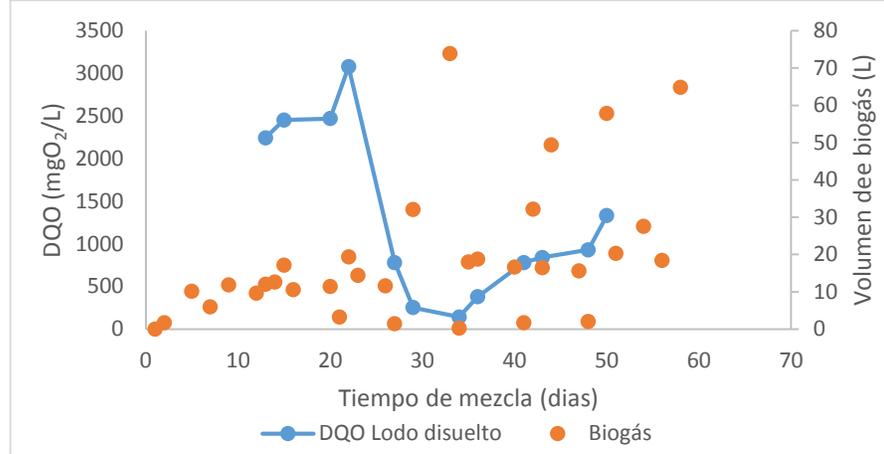
En este caso se analizó el comportamiento del DQO en un tiempo de días, para los reactores 1 y 2, donde se observa que al inicio del proceso el lodo traído de la PTAR contenía una elevada carga para oxidar (aprox. 11500mgO₂/L), sin embargo, en el día 30 se presentó una disminución de este parámetro que contribuyo al aumento en la producción de biogás, este resultado se presentó debido a que los productos que generaban una inhibición se fueron diluyendo y el DQO se empezó a solubilizar y degradar totalmente con un consecuente incremento de producción de biogás en los días siguientes, teniendo en cuenta que la producción de metano se mantuvo en intervalos muy cercanos a 30% como se mostró en los datos de cromatografía anteriormente.

Gráfica 4. DQO lodo disuelto R1.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 5. DQO lodo disuelto R2.



Fuente: elaboración propia.

El reactor 1 se observa un proceso de producción de biogás en ascenso a comparación del reactor 2, que produjo el gas continuamente desde el inicio del proyecto, evidenciando que la degradación de materia orgánica ha sido más evidente en el R1, esto puede ser justificado por el hecho de que los microorganismos contenidos en el primer reactor tienen una producción de biogás más desarrollada que en el segundo reactor, pero sin embargo, tanto el reactor 1 como el reactor 2, como se ve en la tabla 16 siguen una actividad metanogénica similar, ya que producen cantidades de metano similares.

La evolución en la DQO presentó tendencia a aumentar durante el arranque del reactor con valores de 9302 y 7674 mgO₂/L para R1 y R2 respectivamente, indicando la ocurrencia de la etapa de hidrólisis de forma efectiva en la primera etapa del CSTR. En la semana 5, la DQO presentó una reducción a 1283 y 1437 mgO₂/L para cada reactor, indicando la degradación de intermediarios metabólicos y la modificación en las condiciones de acidez del medio de fermentación.

Por otro lado, al analizar las gráficas 6 y 7 de los respectivos reactores donde se trató de hallar la proporcionalidad del pH con el DQO, fue evidente que en algunos puntos de la gráfica se alcanza a evidenciar que su comportamiento puede llegar a ser inversamente proporcional entre sí.

Por último se hizo una comparación entre el DQO con el que ingresaba al reactor y con el DQO final, así a través de un cálculo de porcentaje de biodegradación se obtuvo lo siguiente:

$$\%DQO = \frac{DQO_{inicial} - DQO_{final}}{DQO_{inicial}} * 100$$

$$\%DQO_{R1} = \frac{11500mgO_2/L - 1316mgO_2/L}{11500mgO_2/L} * 100$$

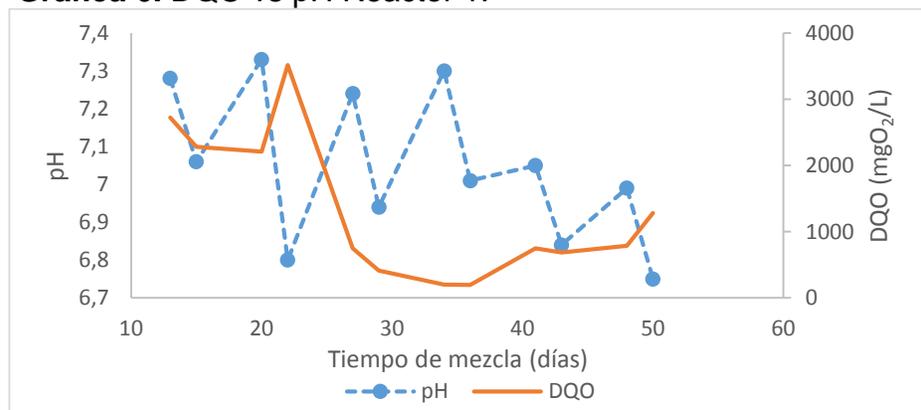
$$\%DQO_{R1} = 88\%$$

$$\%DQO_{R2} = \frac{11500\text{mgO}_2/\text{L} - 1306\text{mgO}_2/\text{L}}{11500\text{mgO}_2/\text{L}} * 100$$

$$\%DQO_{R2} = 89\%$$

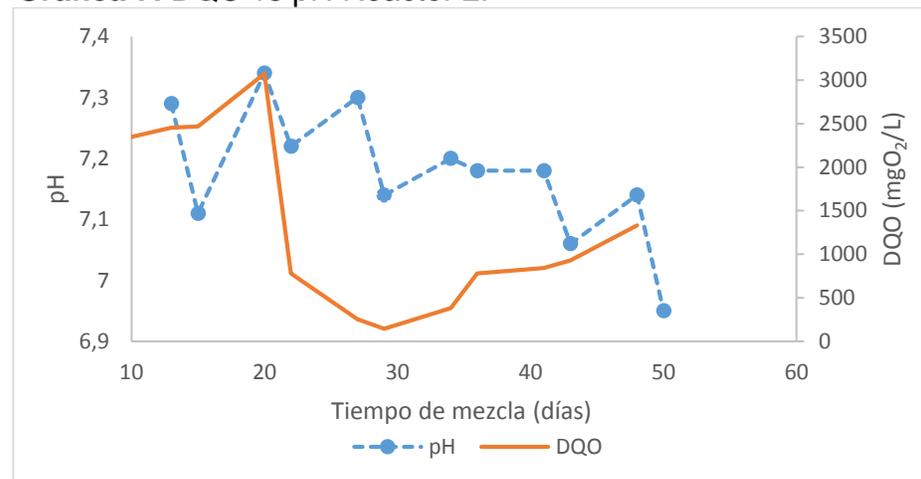
Así, se puede observar, que se consumió casi todo el DQO contenido en la materia orgánica, donde el restante 12% y 11% para R1 y R2 respectivamente, se deduce que puede ser lignina u otra clase de materia orgánica que es difícil de degradar.

Gráfica 6. DQO vs pH Reactor 1.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 7. DQO vs pH Reactor 2.



Fuente: elaboración propia.

3.4 pH

Para el análisis del pH, fue necesario comparar el pH del licor de lodo, proveniente de los reactores, con el volumen de biogás producido, para poder observar si el pH seleccionado anteriormente a través del análisis bibliográfico, fue el mejor.

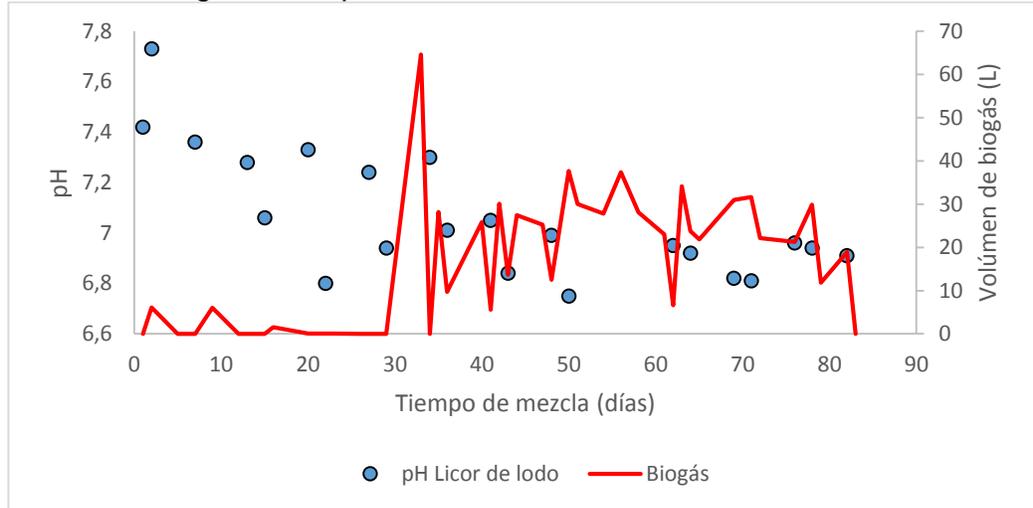
En las gráficas 8 y 9, se puede observar que al iniciar con un pH alto, el volumen del gas es menor, por tanto, al acondicionar con un pH con rango entre 6.8 y 7.4 la producción de gas aumenta y es más estable, produciendo alrededor de 30 L al día,, cumpliéndose así lo propuesto en el marco teórico, ya que, la digestión metanogénica tiene una condición óptima a en un rango de 6.5 a 7.5, y que de llegar a ser menor a 6.4 o mayor a 7.6 habría inhibición en la producción de biogás⁴⁸.

En este sentido, al comparar los dos reactores se puede observar que, si bien no son iguales sus pH, el comportamiento de ambos reactores es similar, y se estabilizan a distintos pH, debido a que se mantienen en el rango óptimo de producción, donde aproximadamente a los 30 días de operación dentro de los reactores, el pH disminuye, aumentando la fase metanogénica y por tanto la producción de biogás, que seguirá estable hacia alrededor de los 70 días. Transcurrido ese tiempo el pH decrece un poco más, así mismo como la producción de gas en el R1, sin embargo, el rango óptimo en el que se debería trabajar se mantiene y por tanto se garantiza que los microorganismos sobrevivan aun en el medio de cultivo y pueda continuarse con la producción de biogás o una posterior co-digestión con algún otro inóculo. Para el R2 el pH decrece pero su producción de gas se mantiene sugiriendo que los microorganismos presentes resisten un poco más a los cambios que en el R1 lo que garantiza que pueda seguir mejorándose el proceso y presente resultados satisfactorios en la calidad y cantidad de biogás⁴⁹. Los resultados podrán verse en tablas, que estarán en el Anexo A.

⁴⁸ GARCÍA M. C. et al. Estudio del proceso bioquímico de fermentación en digestores para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos orgánicos provenientes del campus de la Universidad de El Salvador. Ciudad Universitaria, agosto de 2010.

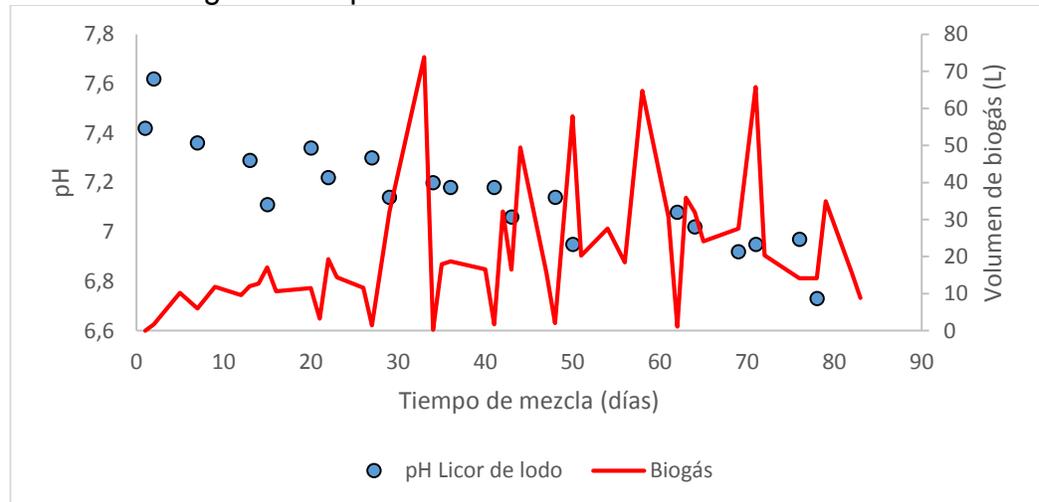
⁴⁹ DEEPNRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S. Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor. En: ELSEVIER. vol. 121, p. 100-104.

Gráfica 8. Seguimiento pH del reactor 1.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 9. Seguimiento pH del reactor 2.



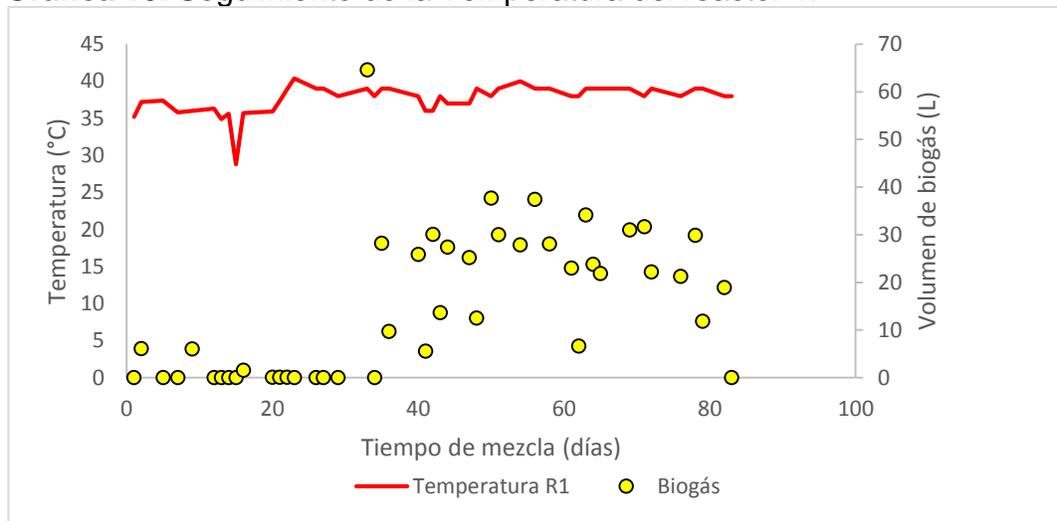
Fuente: elaboración propia.

El descenso en la semana 7 en el pH del lodo digestado con un valor de 6.75 y 6.95 para R1 y R2 puede asociarse con el aumento en los ácidos grasos del sistema, baja cantidad de proteínas y sobrecarga del reactor en términos de material biodegradable, haciendo énfasis en la complejidad del proceso de digestión anaerobia y en la importancia de selección de condiciones óptimas para su operación.

3.5 TEMPERATURA

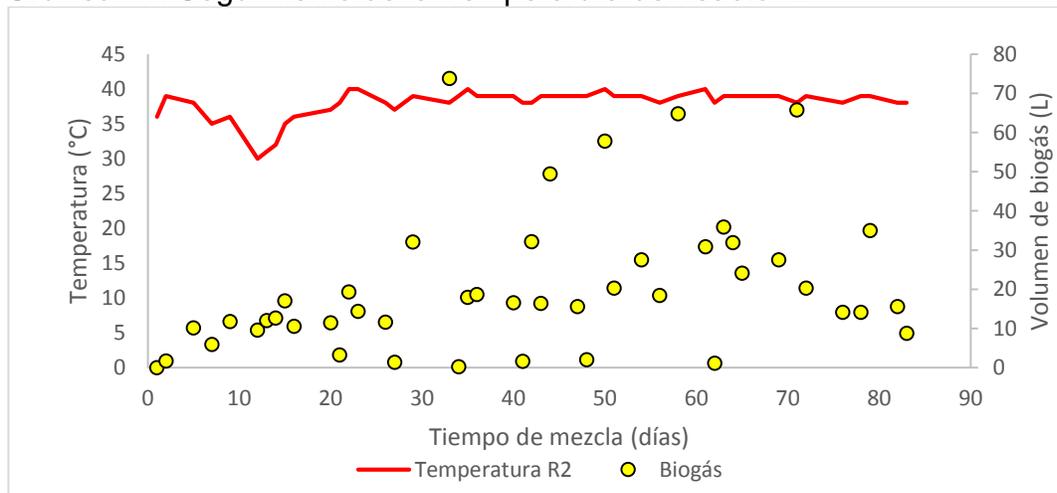
La temperatura usada para los experimentos realizados estuvo en el rango mesofílico debido a lo encontrado en la literatura donde se encontró que se usaba como variable fija, el rango de trabajo fue de $38^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, sin embargo, los primeros días hubo inconvenientes para poder controlar la temperatura, por ello se ven caídas de temperatura hasta los 30°C , que contribuyó en medida a que no hubiera tanta producción de biogás en esos primeros días. La temperatura fue medida diariamente junto con la medición de la producción de biogás, tal como se observa en las gráficas 10 y 11.

Gráfica 10. Seguimiento de la Temperatura del reactor 1.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 11. Seguimiento de la Temperatura del reactor 2.



Fuente: elaboración propia.

Comparando las gráficas de los reactores, siguen un comportamiento similar al del pH, ya que hacia el día 30 de mezcla en el reactor y al mantener estable la temperatura en un rango de $38 \pm 2^{\circ}\text{C}$, la producción de gas aumenta, tal como se puede ver en las gráficas 10 y 11 e igualmente en las tablas que se encuentran en el Anexo B, en más detalle.

Con esto se puede ratificar que, estos sistemas anaeróbicos son dependientes de la temperatura, donde la velocidad de crecimiento de los microorganismos que intervienen en este proceso tiene una relación directamente proporcional con el acondicionamiento de temperaturas porque, a medida que aumenta la temperatura la velocidad de crecimiento de los microorganismos aumenta y acelera el proceso de digestión⁵⁰. Por ello, el sistema propuesto ayuda en gran medida a la producción del combustible gas, ya que al tener un sistema de agitación y un controlador de temperatura, garantizando que la temperatura sea homogénea en el reactor.

Esta selección del sistema se ve reflejado positivamente en la producción del gas, que hacia el día 30 hasta el día 70 aproximadamente, tiende a estabilizarse y a mostrar los mayores picos de producción de biogás tanto en cantidad como en calidad, esto también tiende a ocurrir con la DQO, donde se espera que se estabilice, así mismo, en caso de llegar a bajarse la temperatura la DQO, tiende a bajar aún más de lo previsto, tal como ocurre en lo mostrado en el proyecto de “Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpado del café”, donde se evalúan dos rangos de temperatura y un pH de 7⁵¹.

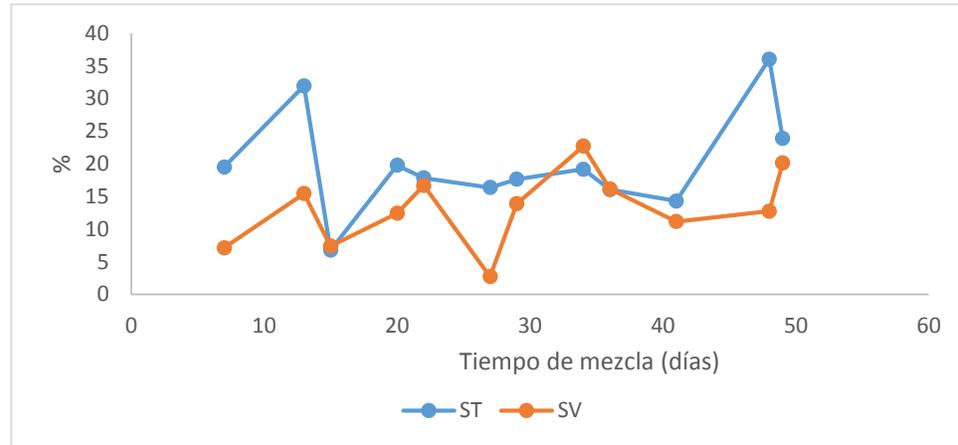
3.6 SÓLIDOS TOTALES, SÓLIDOS FIJOS, SÓLIDOS VOLÁTILES Y HUMEDAD

El reactor CSTR (Continuous-Stirred Tank Reactor) es uno de los reactores más usados en la digestión anaerobia. Es un biodigestor de flujo continuo, con un contenido de sólidos totales que varía entre 7% y 40% y su tiempo de mezcla se encuentra entre 20 a 50 días, estos datos son seleccionados para asegurar un buen funcionamiento de la digestión anaerobia. Por tanto, el proceso experimental realizado en este proyecto cumple con estos parámetros como se observa en las gráficas 12 y 13, donde se tuvo porcentajes en promedio un poco menores a los mencionados anteriormente, para R1 con 20.39% de ST y 15.85% de SV y para R2 los porcentajes en promedio fueron de 30.60% en ST y 20.81% para SV.

⁵⁰ VARNERO MORENO. M.T.Op. Cit., p. 38.

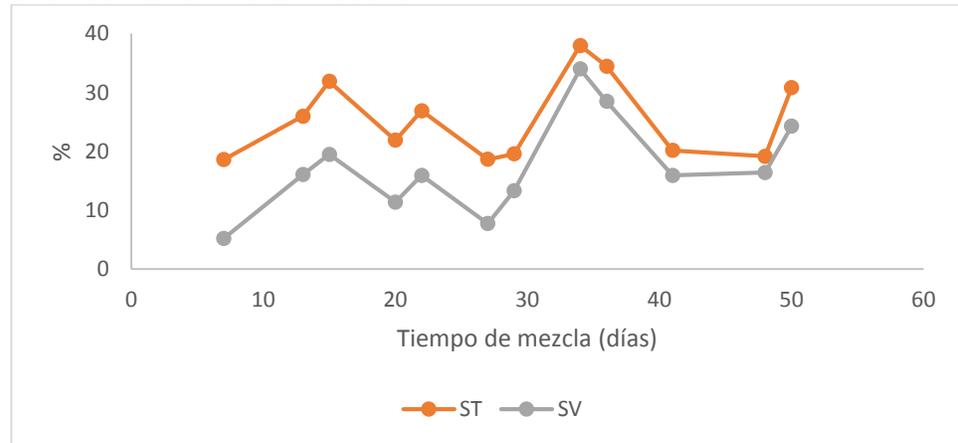
⁵¹ OLVERA J. y GUTIÉRREZ J. Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpado del café. Rev. Colomb. Biotecnol. Vol. XII No. 2 Diciembre 2010 p237

Gráfica 12. ST vs SV reactor 1.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 13. ST vs SV reactor 2.



Fuente: elaboración propia.

Si llegara a existir un alto porcentaje de sólidos totales o un porcentaje superior al 40% de sólidos totales podría causar problemas con respecto a los inhibidores, ya que estos están presentes en forma concentrada debido al bajo contenido de agua siendo capaces de detener el proceso en su totalidad⁵².

En el proceso de digestión anaerobia, los sólidos volátiles son el volumen de materia orgánica que contiene la muestra cargada al reactor que será utilizado en la producción de biogás puesto que teóricamente son los componentes orgánicos que son convertidos en metano⁵³.

⁵² Ministerio Federal de Cooperación económica y desarrollo. Guía sobre el biogás desde la producción hasta el uso. Quinta edición. 2010. p 30

⁵³ CARO MARTÍNEZ. Angela Lizeth. Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás a nivel de planta piloto a partir de residuos orgánicos generados en el frigorífico BLE LTDA. Bogotá D.C. 2014. p.27.

Con respecto a la humedad de los lodos, El volumen de lodo depende en su mayoría del contenido de humedad. Un lodo primario tiene del 91 al 95% de humedad, con un valor típico del 94%. En cambio, un lodo secundario, tiene del 98.5 al 99.5% de humedad, con un valor típico del 99.2%⁵⁴.

Con respecto a la producción de biogás frente a los sólidos volátiles, se evidencio de forma experimental que la generación máxima de biogás en 50 días coincidía con la generación máxima de solidos volátiles en esos mismos días, dando a entender que el día 33 fue la época con mayor generación de materia orgánica de los microorganismos y generando una relación directamente proporcional con la producción de biogás, más no de la actividad metanogénica como se muestra en la tabla 16 en donde la producción de metano permanece con una tendencia constante.

3.7 ANÁLISIS DE NITRATOS, NITRITOS, FÓSFOROS

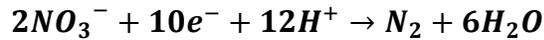
El nitrógeno en procesos de digestión anaerobia constituye un problema circunstancial, ya que la oxidación del amonio genera nitratos y nitritos, que disminuyen la producción de biogás produciendo inestabilidad en los reactores, especialmente por la disminución del potencial de óxido-reducción.

Como se puede evidenciar en las gráficas 14 y 15, la concentración de nitritos empezó muy elevada en el R1, con tendencia a la disminución en los días 27 al 29, lo que pudo ser beneficioso al sistema debido a un aumento en la producción de biogás luego en los días siguientes la producción de este compuesto volvió a aumentar generando inhibición con la consecuente disminución de biogás, posiblemente también al aumento del nitrógeno amoniacal que como consecuencia trajo un aumento en el pH, que paso de ser 6.8 a 7.24, siendo estos microorganismos muy sensibles este tipo de cambios.

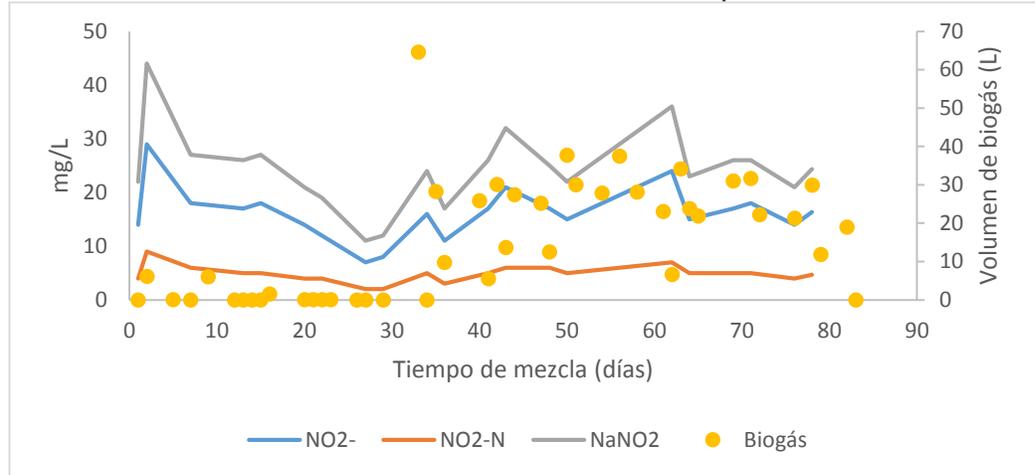
Para R2 el comportamiento de estos compuestos fue muy variable, en vez de presentar una disminución constante presentaba datos variables generando también una producción de biogás discontinua, a pesar de estos resultados la oxidación de nitritos a nitratos no ocurrió y su pH se mantuvo en un rango aceptable, esto puede indicar una posible estabilización en el proceso de desnitrificación: nitrificación del sistema anaerobio. En este caso, ocurre una reacción redox, en respuesta a la oxidación de materia orgánica y por tanto, la producción de N₂. En

⁵⁴ METCALF & EDDY, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th Edition, McGraw-Hill, New York. 2003

este caso los microorganismos son los dadores de electrones y la materia orgánica (NO_3) es el aceptor final de electrones, allí se presenta la siguiente reacción redox⁵⁵:

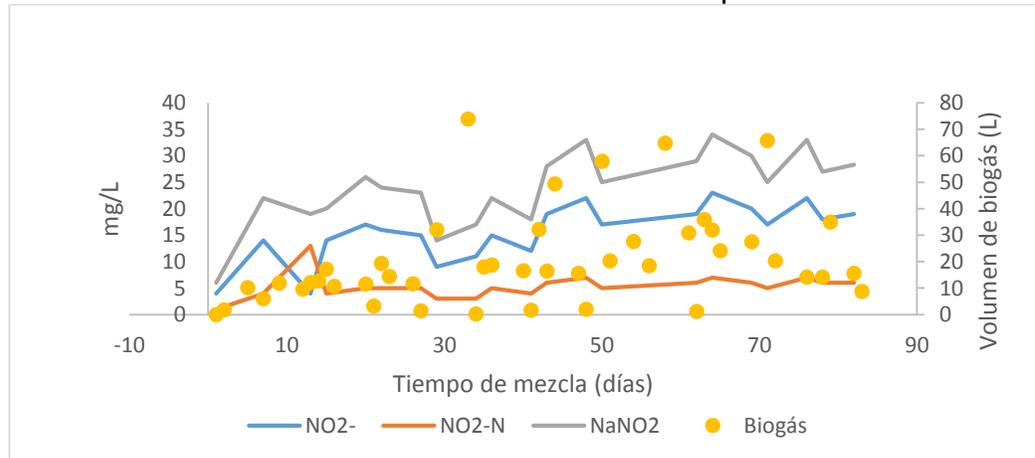


Gráfica 14. Obtención de nitritos en R1 en un tiempo de 82 días.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 15. Obtención de nitritos en R2 en un tiempo de 82 días.



Fuente: elaboración propia.

Con respecto al fósforo inorgánico presentado en los reactores, se debe tener en cuenta que estos son esenciales para el crecimiento de los organismos, por esta razón era necesario identificar la producción que estaban obteniendo los dos reactores y como afectaban la producción del gas.

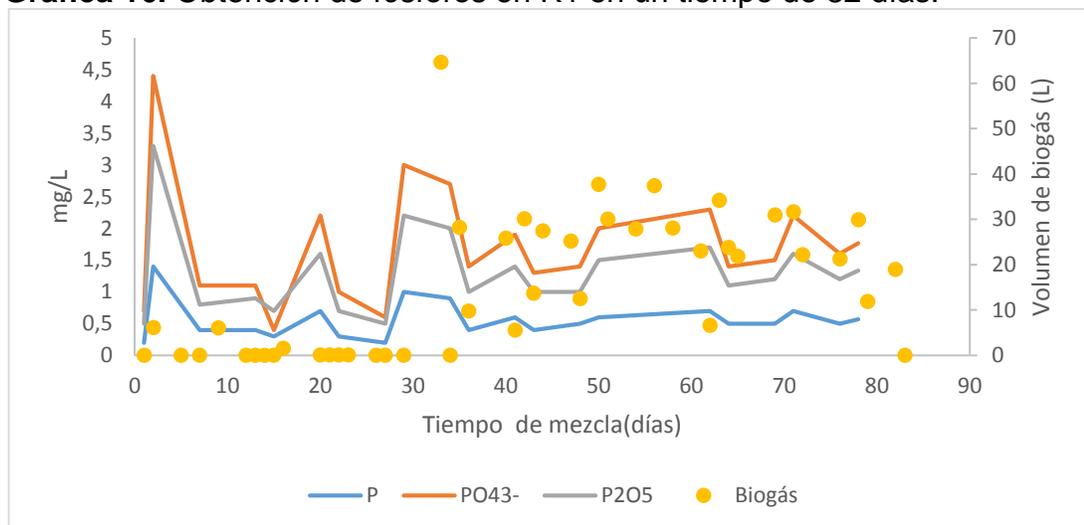
⁵⁵ SÁNCHEZ CARRILLO S. Importancia del potencial redox en la biogeoquímica de los ecosistemas acuáticos. Departamento de Biogeoquímica y Ecología Microbiana. CSIC. España. 2010

Los lodos depositados en el R1 fueron ingresados con una carga de fosforo 4.4 mg/L como nutriente para el crecimiento de los microorganismos, luego su cantidad descendió abruptamente indicando que el fosforo inicial había terminado dando paso a que nuevas células se pudieran generar, este descenso debió generar un cambio en la producción del biogás, pero debido a condiciones externas de acondicionamiento del reactor no genero ninguna producción.

En los días del 40 al 78 se genera una posible estabilización con una producción máxima del biogás de 62L y un contenido de fosforo suministrado por el alimento diario de 2.3 mg/L.

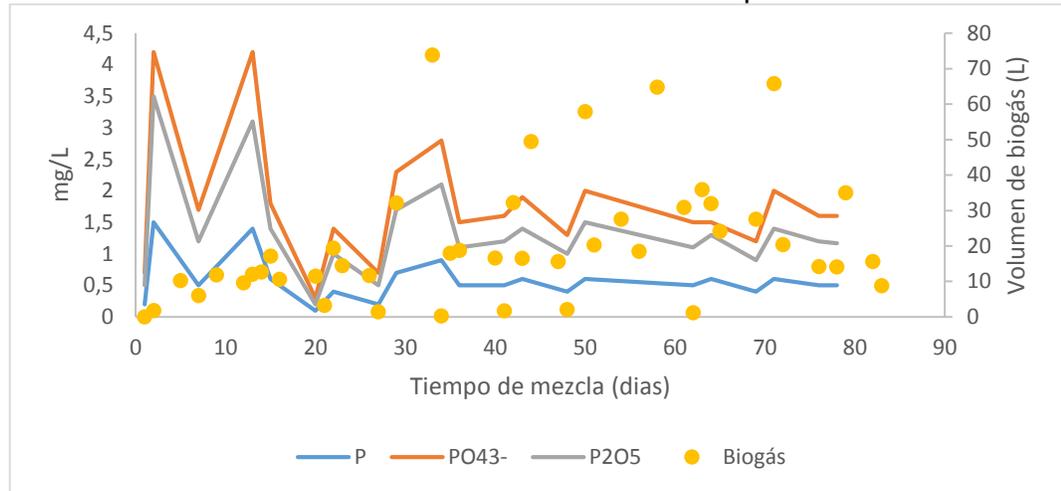
Para el reactor 2, los días 22 y 29 fueron los que menor obtención de fosforo presentando una producción baja de biogás de 20L lo que hace pensar que el alimento suministrado no era el mejor ya que no generaba un aumento de macronutrientes para que los microorganismos pudieran llegar a su producción máxima.

Gráfica 16. Obtención de fósforos en R1 en un tiempo de 82 días.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 17. Obtención de fósforos en R2 en un tiempo de 82 días.

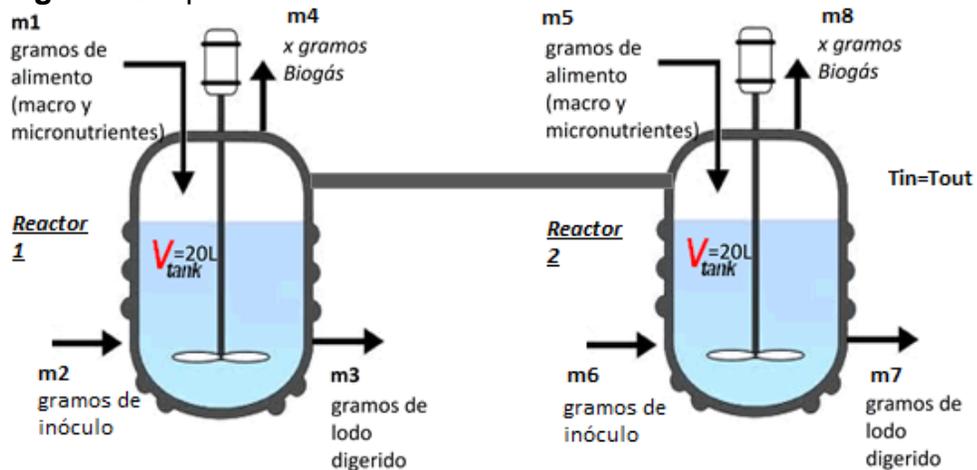


Fuente: elaboración propia.

3.8 BALANCE DE MATERIA

Se realizó un balance de masa para determinar el valor másico del biogás que se produce en el proceso tal como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 18. Aproximación balance de materia.



Fuente: elaboración propia.

Este balance se desarrolla con el fin de observar la producción cuantitativa del biogás en los dos reactores y así poder lograr una aproximación de la cantidad de biogás generado por cada reactor.

Por tanto, el procedimiento realizado para la adecuación del reactor fue el siguiente; cada uno de los reactores se le ingresó un inóculo de 15L, que contenía lodo

proveniente de la PTAR, y que ya venía tratado, por tanto, era un lodo primario, teniendo en cuenta que la densidad del lodo era de 1,001g/mL, así, la masa de inóculo de cada reactor se calculó de la siguiente forma:

$$m2 = \frac{1,001g}{mL} * 15000mL = 15015g \text{ lodo primario}$$

$$m6 = \frac{1,001g}{mL} * 15000mL = 15015g \text{ lodo primario}$$

Transcurrido un tiempo (alrededor de 5 días) se empezó a alimentar los reactores diariamente de lunes a viernes, con macronutrientes y micronutrientes, disueltos en 100 mL de agua, y por tanto un volumen de 150mL, que al igual que con el inóculo se pudo calcular su peso en masa, de la siguiente forma:

$$\text{peso agua} = \frac{1g}{mL} * 100mL = 100g$$

$$\text{peso macronutrientes} = 25 g$$

$$\text{peso micronutrientes} = 10g$$

Al tener en cuenta que la alimentación se hizo durante 88 días aproximadamente, teniendo en cuenta que los fines de semana no se alimentaban, la masa de alimentación dio como resultado lo siguiente:

$$m1 = 88días * \frac{135g}{día} = 11880g$$

$$m5 = 88días * \frac{135g}{día} = 11880g$$

Por otra parte, los días martes y jueves, tenía que retirarse 300mL de lodo digestado, por tanto, en lo que duró el proyecto, se retiró lodo del reactor 35 días y se calculó de la siguiente manera la masa del lodo digestado, teniendo en cuenta la densidad que fue hallada en el anterior capítulo:

$$m3 = 35días * \frac{300mL}{día} * \frac{0,943g}{mL} = 9901,5g \text{ lodo digestado}$$

$$m7 = 35días * \frac{300mL}{día} * \frac{0,943g}{mL} = 9901,5g \text{ lodo digestado}$$

Así, teniendo en cuenta que en el balance de masa lo que entra es igual a lo que sale se planteó el siguiente balance para ver la producción de biogás:

$$m1 + m2 = m3 + m4$$

E igualmente que:

$$m5 + m6 = m7 + m8$$

Donde tanto $m4$ y $m8$, son las masas a encontrar.

$$m4 = m1 + m2 - m3$$

$$m4 = 11880g + 15015g - 9901.5g$$

$$\mathbf{m4 = 16993.5g \text{ biogás}}$$

$$m8 = m5 + m6 - m7$$

$$m8 = 11880g + 15015g - 9901.5g$$

$$\mathbf{m8 = 16993.5g \text{ biogás}}$$

Por ello al comparar el balance de masa hecho anteriormente con el total de biogás producido y medido ocurre lo siguiente:

Reactor 1:

$$mCH_4 = 693.808L * \frac{1molCH_4}{22.4L} * \frac{16gCH_4}{1molCH_4} * 35\% = 173.45gCH_4$$

$$mCO_2 = 693.808L * \frac{1molCO_2}{22.4L} * \frac{48gCO_2}{1molCO_2} * 60\% = 892.04gCO_2$$

$$mH_2O = 693.808L * \frac{1molH_2O}{22.4L} * \frac{18gH_2O}{1molH_2O} * 5\% = 27.88gH_2O$$

Reactor 2:

$$mCH_4 = 944.116L * \frac{1molCH_4}{22.4L} * \frac{16gCH_4}{1molCH_4} * 35\% = 236.03gCH_4$$

$$mCO_2 = 944.116L * \frac{1molCO_2}{22.4L} * \frac{48gCO_2}{1molCO_2} * 60\% = 1213.86gCO_2$$

$$mH_2O = 944.116L * \frac{1molH_2O}{22.4L} * \frac{18gH_2O}{1molH_2O} * 5\% = 37.932gH_2O$$

Al realizar la sumatoria del biogás producido para ambos reactores, se obtiene un resultado de 1093.367g de biogás del reactor 1 mientras para el reactor 2 de 1487.8254g de biogás, es decir, un total de 2581.19g de biogás, sumando ambas producciones. Por lo tanto, si se compara con la producción teórica hallada a través del balance de masa, no concuerda, debido a que pudieron existir pérdidas de biogás o errores experimentales a la hora de retirar el lodo digestado del reactor, pero principalmente a que en este balance de materia no se tuvo en cuenta la acumulación que hay en el espacio restante de los 20L del reactor, ya que están contenidos con 15L de lodo y hay un restante de 5L, en los que puede haber más biogás que no es medido en los flujómetros, es decir, que no sube por el ducto hacia los flujómetros y queda acumulado o estancado en el reactor, por tanto, no se tiene la certeza de cuánto biogás hay acumulado y no es medido.

3.9 POTENCIAL ENERGÉTICO TEÓRICO

Para la determinación del potencial energético teórico se tiene que saber primero que:

- 693.808 L (R1) y 944.116 L (R2) de biogás producido a lo largo del proyecto.
- Fracción de 31% de metano promedio (CH₄) en el biogás
- El valor calorífico del metano (CH₄) es 10.26 kWh/m³.

Ahora en este caso se tiene una producción de para calcular la producción de biogás promedio diaria se realizó lo siguiente:

$$Biogás_{R1} = \frac{693.808 L}{84d} * \frac{1m^3}{1000L} = 0.008162447 \frac{m^3}{d}$$

$$Biogás_{R2} = \frac{944.116 L}{84d} * \frac{1m^3}{1000L} = 0.011107247 \frac{m^3}{d}$$

Por tanto, el potencial energético teórico se procede a usar la siguiente fórmula⁵⁶:

$$Px_{Ri} = Q_G * P_{CH_4} * H_C$$

Donde:

- Px: Potencial energético por día (kWh/d)
- Q_G: Flujo de biogás (m³/d)
- P_{CH₄}: Fracción de metano promedio en el biogás (%)

⁵⁶ CENDALES LADINO E.D. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Tesis de maestría. Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. 2011. p99

- Hc: Poder calorífico inferior del gas metano

$$Px_{R1} = 0.008162447 \frac{m^3}{d} * 10.26 \frac{kWh}{m^3} * 31\% = 0.02596148 \frac{kWh}{d}$$

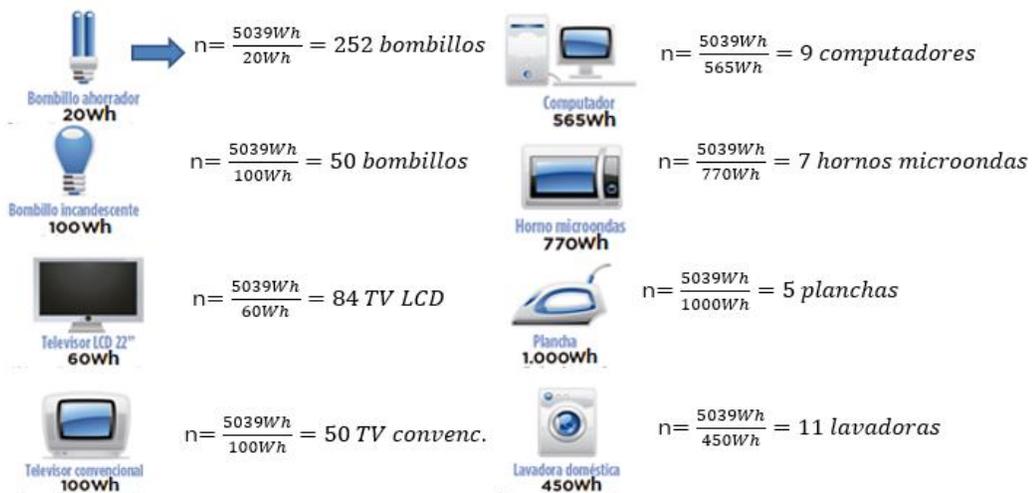
$$Px_{R2} = 0.011107247 \frac{m^3}{d} * 10.26 \frac{kWh}{m^3} * 31\% = 0.03332174 \frac{kWh}{d}$$

$$Px_{R1} + Px_{R2} = 0.02596148 \frac{kWh}{h} + 0.03332174 \frac{kWh}{h} = \mathbf{0.05928322 \frac{kWh}{d}}$$

$$P_{total\ w} = 0.05928322 \frac{kWh}{d} * 85d * \frac{1000Wh}{1kWh} = \mathbf{5039.07372\ Wh}$$

En la figura 19 se encuentran las equivalencias energéticas a las que se le puede dar uso el biogás producido, ya que con los 5039.07Wh, es un potencial energético que puede ser usado en varias cosas de la vida cotidiana tales como bombillas o electrodomésticos de uso doméstico como se puede ver a continuación:

Figura 19. Tabla de equivalencias potencial energético.



Fuente: elaboración propia basada en EL HERALDO. [Consultado: 10 de noviembre de 2018]. Disponible en: https://www.elheraldo.co/sites/default/files/body/2016/03/09/articulo/conoce_el_consumo_de_tus_electromesticos.jpg

Lo visto en el cálculo de las equivalencias mostradas anteriormente da paso para que en posteriores proyectos se pueda producir energía de manera más estable y sustentable, con el fin de que en un futuro en la Pontificia Universidad Javeriana, se haga uso de este tipo de energía para los diversos equipos que se manejan a diario en los laboratorios de la facultad de Química, sin necesidad de hacer uso de energía fósil, que hoy en día contamina en gran medida a el medio ambiente.

4. CONCLUSIONES

Para el presente estudio de aplicación experimental realizado para la digestión de lodos residuales, se han deducido las siguientes conclusiones:

- Se definieron las condiciones de operación para la puesta en marcha de los reactores, que, si bien no arrojaron la producción de gas con un contenido de metano cercano al 60%, el valor máximo que se obtuvo a lo largo del proyecto para R1 fue de 43.65% y para R2 fue de 54.76%. Luego se presentó decrecimiento hacia la fase final, posiblemente al aumento de ácidos grasos dentro del inóculo, pero que en general la producción se mantuvo estable en un promedio de 31% para los dos reactores.
- Se realizó el correspondiente análisis físico-químico, donde fueron evaluados los diferentes parámetros y se obtuvieron los siguientes resultados; para pH un promedio de 7.06 para R1 y de 7.14 para R2, una temperatura promedio de 38°C, un promedio de sólidos totales y de sólidos volátiles de 20.39% y 15.84% respectivamente en R1 y un promedio de sólidos totales y sólidos volátiles de 30.60% y 20.81% respectivamente en R2, por último un DQO final de 1316 mgO₂/L y 1306 mgO₂/L para R1 y R2 respectivamente, logrando un porcentaje de degradación del 88% y del 89%.
- Se hizo uso de una relación de C/N de 10.3/1, siendo esta una relación no recomendada por otros autores ya mencionados debido a que contenía muy bajo carbono, causó una disminución en la generación y la producción volumétrica de metano comparado con las relaciones reportadas en otros trabajos.
- Se evaluó de forma tanto cualitativa como de forma cuantitativa la producción de gas, comparando los datos teóricos con los datos experimentales, mostrando que debido a posibles inhibiciones o aumento de ácidos grasos la producción de gas no fue la esperada, pero sin embargo sigue el comportamiento reportado por algunos autores.
- El rendimiento real en la producción de metano de la digestión de lodos residuales fue de 276.25 mL CH₄/g SV para el R1 y de 208.25 mL CH₄/g SV para el R2 con respecto a el teórico que fue de 445.64 L CH₄/Kg SV obteniéndose un 62% y 48% de eficiencia, el cual se encuentra por debajo de los porcentajes reportados por otros trabajos, este puede ser debido a problemas operacionales asociados con fugas, algún requerimiento de pre-tratamiento, o elevada carga orgánica en el reactor, entre otras. El BMP llevado a cabo como reactor batch, proporcionó resultados de generación de biogás en reactores estacionarios,

como un uso alternativo de bajo costo, la forma en que se desarrolló este experimento de BMP se encontrará en el anexo J, allí se encontrará la metodología usada en ese experimento y sus respectivos resultados.

- La determinación del potencial energético teórico proporcionó, un resultado entre ambos reactores de 5039.073 Wh el cual se hizo en base en un tiempo inferior de un año (aprox 4 meses), concluyendo que esta energía podría ser útil a futuro para los equipos de la PUJ que consuman una energía menor o igual a la proporcionada como lo son computadores, cromatógrafos, deshumidificadores, etc.

5. RECOMENDACIONES

- Se debe revisar que la materia de carga no posea inhibidores (en concentración de inhibición) antes de introducirlas al reactor y durante el proceso de la digestión anaerobia, estos inhibidores se encuentran en el Anexo G.
- Se debe realizar la caracterización de los lodos residuales o materia orgánica con suficiente tiempo de antelación, esto con el fin de determinar con exactitud la cantidad de carga orgánica que existe e identificar un posible inhibidor que afecte a futuro la producción de biogás.
- Es necesario mantener una relación C/N en valores aproximados entre 20:1 o 30:1 para que la generación de biogás sea constante así mismo como su producción bacteriana, para esto es recomendable usar combinaciones de sustratos que ayuden a equilibrar este balance.
- Si se requiere realizar un arranque de un reactor que trabaja con lodos residuales activados es recomendable conocer la edad y proporción en porcentaje que se debe agregar de material inoculador, mientras menor sea la edad y mayor la proporción, mayor será la eficacia, para esto el anexo H nos muestra en forma de tabla el porcentaje que se debe ingresar dependiendo de la edad de esa materia orgánica.
- De igual manera, el pH es un factor importante para crear un hábitat adecuado para las bacterias que se encargan de descomponer la biomasa, por tanto se sugiere, se siga manteniendo en el rango propuesto en el proyecto, el cual debe permanecer entre 6.5 y 7.5⁵⁷.
- Se sugiere evaluar otros tipos de unidades de digestión anaerobia complementario al sistema CSTR, tales como un UASB, en configuración por lotes y semi-continuo. Esta aplicación puede permitir dar un paso en dirección al escalamiento de este sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos.
- Se recomienda evaluar la presencia de siloxanos y H₂S en el biogás, esto con el fin de que, en un posterior uso, no presente corrosión u afectación en distintos equipos que puedan usar el biogás como fuente de energía.

⁵⁷ OLAYA, Y.; (2006). Diseño de un biodigestor de cúpula fija. Trabajo de Grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira.

- Se recomienda realizar montajes experimentales de la digestión anaerobia donde se separe cada una de las fases esta digestión, con el fin de que se tenga mayor control y una mejor producción de biogás.
- Se recomienda determinar ácidos grasos a través de electroforesis capilar, potencial de óxido-reducción y nitrógeno amoniacal, ya que la identificación de estos parámetros ayuda en la mejora del proceso de producción de biogás e igualmente una posterior co-digestión de los lodos con otro inóculo, que pueda mejorar las propiedades de los microorganismos presentes en ellos.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Et al. Método estándar 2540. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21 ed., 2005 New York.2012

A. YAGUAL. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio prototipo de bajo costo, Trabajo de grado. Ingeniería Mecánica. Quito. Universidad San Francisco de Quito.2015. p43

BABSON M, David M. et al, Anaerobic digestion for methane generation and ammonia reforming for hydrogen production: A thermodynamic energy balance of a model system to demonstrate net energy feasibility, The Ohio State University, United States. 2013. p. 496

BAUTISTA BUHIGAS A. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos (Estelí, Nicaragua). Universidad Carlos III de Madrid, Escuela politécnica superior. Leganés, España, 2010.p20

BROWN, D., & Li, Y. (2013). Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. Bioresource Technology, 127, 275–280.

CÁRDENAS CLEVES L. M. et al. Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. 2016.

CARO MARTÍNEZ. Angela Lizeth. Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás a nivel de planta piloto a partir de residuos orgánicos generados en el frigorífico BLE LTDA. Bogotá D.C. 2014. p.27.

CENDALES LADINO, E. D. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Tesis de maestría. Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. 2011. p. 13 y p99

CONTRERAS L; DOMÍNGUEZ P. “Producción de Biogás con fines Energéticos. De lo histórico a lo Energético. Revista Futuros Volumen VI”.

Corace, J.J.; Aeberhard, M.R.; Martina, P.A.; Ventín, A.M.; García S., E.; (2006). Comparación del tiempo de reacción en el proceso de biodigestión según el tamaño de las partículas de aserrín utilizado como materia orgánica. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2006, Universidad Nacional del Nordeste, Resumen T-034, 4p.

DEEPNRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V. y JAYARAJ, S. Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor. En: ELSEVIER. Vol. 121, p. 100-104.

DEUTSCHE GESSELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT, Guía sobre el Biogás, traducido por Cooperación tecnológica en el sector energético y el Programa Gestión Ambiental Urbana e Industrial en México, 5 ed. Gülzow 2010. p. 24.

DÍAZ, A. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya. Tesis de maestría. Escola de Camins. Barcelona. 2013.

DIAZ-BAEZ María consuelo, ESPITIA VARGAS Sandra, MOLINA PEREZ Francisco. Digestion anaerobia una aproximación a la tecnología. Universidad Nacional de Colombia. Bogota, junio de 2002.

FIBRAS Y NORMAS DE COLOMBIA S.A.S. Lodos activados: Tratamientos y métodos. 2018.

GARCÍA M. C. et al. Estudio del proceso bioquímico de fermentación en digestores para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos orgánicos provenientes del campus de la Universidad de El Salvador. Ciudad Universitaria. El Salvador. Agosto de 2010.

G. ESPOSITO et al. Bio-Methane Potential Tests To Measure The Biogas Production From The Digestion and Co-Digestion of Complex Organic Substrates. The Open Environmental Engineering Journal .18 de enero de 2012. ISSN: 1874-8295 — Volume 7, 2014

GONZALEZ GRANADOS I. C., Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR, Universidad San Francisco de Quito, Tesis doctoral, Córdoba, 2015.

GONZÁLEZ DIAZ Y. Determinación del potencial energético de los Residuos Sólidos Urbanos en tres municipios de la provincia de Luanda, Angola. Departamento de Ingeniería Química. Santiago de Cuba. 2015.

GOODMAN, B.L. Processing thickened sludge with chemical conditioners. Pages 78 et seq. in Sludge Concentration, Filtration and Incineration. Univ. Michigan Continued Education Ser. No. 113, Ann Arbor. 1964.

GRATTEAU, J.C. & R.I. DICK. Activated sludge suspended solids determinations. Water Sewage Works 115:468. 1968.

G.SOLARI. Ficha técnica biodigestores. Lima. Universidad Alas Peruanas 2004.

GUERRERO OLIVER OTERO, Evaluación del potencial de producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de la caña de azúcar, UNIVERSIDAD ICESI FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES PROGRAMA DE QUÍMICA, Cali 2017.

GUÍA PARA EL MANEJO, TRATAMIENTO Y DISPOSICION DE LODOS RESIDUALES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO MUNICIPALES, Comisión nacional del agua, diciembre, 2007.

GUTIÉRREZ TAMAYO P.A., RODRÍGUEZ TORRES C.C. Propuesta de mejora del proceso de producción de biogás en Jerusalén (Cundinamarca). Trabajo de grado. Ingeniería Química. Bogotá D.C. Universidad de América. 2018 p. 32

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización, Bogotá: en instituto, 2018, p.1.

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5313. Bogotá; el instituto 2008, p. 12.

_____. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 4490. Bogotá: el instituto, 1998, p. 12.

LESTEUR M, BELLON-MAUREL V, GONZALEZ C, LATRILLE E, ROGER JM, JUNQUA G, et al. Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: a review. Process Biochem. 2010; 45:431-40.

METCALF & EDDY, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th Edition, McGraw-Hill, New York. 2003.

MINISTERIO FEDERAL DE COOPERACIÓN ECONÓMICA Y DESARROLLO. Guía sobre el biogás desde la producción hasta el uso. Quinta edición. 2010. p 30

MONTES CARMONA M. E., Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid. 2008, p.37.

MORERO, B. y CAMPANELLA, E. ASimulación del Proceso de Absorción Química con Soluciones de Aminas para la Purificación Biogás. Información Tecnológica, vol.24, n°.1, p.25-32. 2013.

NIZAMI, A. S., SINGH, A., MURPHY, J. D. Design, commissioning, and start-up of a sequentially fed leach bed reactor complete with an Upflow anaerobic sludge blanket digesting grass silage. Energy and Fuels, 25(2), 823–834. 2011

OLAYA, Y.; (2006). Diseño de un biodigestor de cúpula fija. Trabajo de Grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira.

OLVERA J. y GUTIÉRREZ J. Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpa del café. Rev. Colomb. Biotecnol. Vol. XII No. 2 Diciembre 2010 p237

ORTEGA VALBUENA, P.M. Desarrollo de un montaje por etapas a nivel banco para la obtención de biogás a partir de residuos vegetales. Trabajo de grado. Ingeniería Química. Bogotá D.C. Universidad de América. 2014 p. 26.

OWEN WF. Et al. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. Water Res. 1979; 13(6):485-92.

PACHECO GONZÁLEZ, S.I. CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN DIGESTOR ANAEROBIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE ALIMENTOS Y PODA A ESCALA BANCO. Universidad Nacional de Colombia. Manizalez. 2016 p.62.

RED MEXICANA DE BIOENERGÍA, Biogás, recuperado de: "<http://rembio.org.mx/areas-tematicas/biogas/>"

RIVAS C., Mota M. Temas de bacteriología y virología médica. Cap 21. Bacterias anaerobias. p.356

RUIZ SALDAÑA A. P. Y QUEVEDO Moscoso L. A. ANÁLISIS DE LOS LODOS PROVENIENTES DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE GUATAVITA, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C, 2017.

SÁNCHEZ CARRILLO S. Importancia del potencial redox en la biogeoquímica de los ecosistemas acuáticos. Departamento de Biogeoquímica y Ecología Microbiana. CSIC. España. 2010

SANTOSH, et al. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques. Bioresource Technology. 2004. 95, 1- 10.

S. DURANDEAU STEGMANN. Biogás: Un Combustible Sustentable El caso del Relleno Sanitario y Central Loma Los Colorados. KDM Energía S.A.2011

SOLUCIONES PRÁCTICAS ITDG. Ficha técnica biodigestores. p.1

SOUZA, José y SCHAEFFER, Lirio. SISTEMA DE COMPRESIÓN DE BIOGÁS Y BIOMETANO. 2013, vol.24, n.6, pp.03-08.

SYMONS, G.E. & B. MOREY. The effect of drying time on the determination of solids in sewage and sewage sludges. Sewage Works J. 13:936. 1941.

Tomado de <http://www.redagricola.com/reportajes/energia/lo-basico-para-entender-el-biogas>.

Tomado de Jairo Chaúr Bernal. "EL BIOGÁS" Boletín Didáctico N° 32. Bogotá, DC, abril de 2001.

Tomado de
<http://www.umich.edu/~elements/fogler&gurmen/html/asyLearn/bits/cstr/index.htm>

VARNERO MORENO. M.T. Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Manual del biogás. 2011. Chile, p. 14-19/35-44.

ANEXOS

ANEXO A.

pH.

Articulo/ tesis	Resumen	pH	Resultados
<p>Anaerobic digestion of brewery primary sludge to enhance bioenergy. Matthew T. Agler. 2009</p>	<p>Se utilizó las aguas residuales de una fábrica de cerveza en forma de lodo primario para la investigación de su potencial como fuente de energía (metano)</p>	<p>Desde el primer día, hasta el día 250 se toman muestras de pH para llevar un control de la estabilidad de los reactores para las condiciones mesofílicas, estableciendo un pH de mínimo 6.5 para no generar un entorno ácido.</p>	<p>El pH se estabilizó en un rango de 7 a 7.8 donde la producción de metano fue considerable.</p>
<p>Digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Germán López Martínez. 2004</p>	<p>Se utilizó residuos urbanos como sustrato, donde las variables de proceso fueron contenidas de sólidos totales y adición o no de inóculo. Afirma que el pH óptimo para el crecimiento bacteriano se encuentra en 6.5-7.5; pH por encima de 9 y debajo de 4.5 pueden llegar a dañar las células por alteraciones en el pH interno de estas.</p>	<p>Desde el primer día de experimento se adiciona bicarbonato de calcio para controlar el pH por encima del ácido, es decir, se establece un pH mínimo de 6.5 para todos los experimentos realizados.</p>	<p>Se mide el pH cada 3 días por medio de un pH metro digital asegurando que el pH no baje de 6.5, encontrando que las muestras sin contenido de inóculo alcanzan un pH máximo de 8-8.4 y las muestras con inóculo no superan el pH de 7.5, llegando a la conclusión que las muestras con inóculo tienen menor variación de pH durante el proceso.</p>

<p>Desarrollo de un montaje por etapas a nivel banco para la obtención de biogás a partir de residuos vegetales. Paola Margarita Ortega Valbuena, Julieth Andrea Pulido Valero. 2014</p>	<p>La investigación se basó en estudiar muestras con proporciones diferentes de sustrato (residuos de frutas, verduras y hortalizas) e inóculo.</p>	<p>El pH óptimo está entre 6.6 y 7.2. Si se presenta un cambio de pH por debajo de 4.5 o encima de 8.3 se inicia la desnaturalización de las estructuras proteicas y se detiene el proceso, por lo tanto, se adiciona hidróxido de sodio al 0.8N para estabilizar el sistema. Para el experimento el pH del sustrato es de 5.3.</p>	<p>La muestra con proporción equitativa de residuos e inóculo presentó valores bajos de metano, 25mL CH₄/gSV, y a la vez fue el experimento que presentó una mayor disminución de pH, de 7.6 a 6.4, lo cual pudo ocasionar la reducción de la actividad bacteriana con respecto a las demás.</p>
--	---	---	---

Figura 20. pH del reactor 1 y reactor 2 respectivamente

Días	pH
1	7.42
2	7.73
7	7.36
13	7.28
15	7.06
20	7.33
22	6.8
27	7.24
29	6.94
34	7.3
36	7.01
41	7.05
43	6.84
48	6.99
50	6.75
62	6.95
64	6.92
69	6.82
71	6.81
76	6.96
78	6.94
82	6.91

Días	pH
1	7.42
2	7.62
7	7.36
13	7.29
15	7.11
20	7.34
22	7.22
27	7.3
29	7.14
34	7.2
36	7.18
41	7.18
43	7.06
48	7.14
50	6.95
62	7.08
64	7.02
69	6.92
71	6.95
76	6.97
78	6.73
82	6.94

Fuente: elaboración propia.

ANEXO B.
TEMPERATURA.

Articulo/ tesis	Resumen	Temperatura	Resultados
<p>Anaerobic digestion of brewery primary sludge to enhance bioenergy. Matthew T. Agler. 2009</p>	<p>Se utilizó las aguas residuales de una fábrica de cerveza en forma de lodo primario para la investigación de su potencial como fuente de energía (metano)</p>	<p>Desde el primer día hasta el día 250 se monitoreo la temperatura, ya que definieron que era un factor importante para que el proceso se pudiera efectuar correctamente escogiendo las condiciones mesofilicas, como punto de partido en la producción de biogás.</p>	<p>Se concluyó que las tasas de producción volumétricas de metano no cambiaron considerablemente durante los aumentos de temperatura de 37 a 39 ° C y de 39 a 41 ° C. Sin embargo, más allá de 41 ° C, la metanogénesis se convirtió en el paso limitante de la velocidad en la hidrólisis porque las concentraciones de AGV aumentaron considerablemente.</p>

Figura 21. Temperaturas del reactor 1.

Días	Temperatura (°C)	Volumen biogás (L)
1	35,2	0
2	37,2	6,1
5	37,4	0,02
7	35,8	0
9	36	6
12	36,3	0
13	34,9	0
14	35,6	0
15	28,8	0
16	35,7	1,564
20	35,9	0,052
21	37,4	0,052
22	38,9	0,052
23	40,4	0,04
26	39	0
27	39	0
29	38	0
33	39	64,584
34	38	0
35	39	28,208
36	39	9,72
40	38	25,824
41	36	5,56
42	36	30,088
43	38	13,664

Días	Temperatura (°C)	Volumen biogás (L)
44	37	27,424
47	37	25,216
48	39	12,512
50	38	37,704
51	39	30,016
54	40	27,84
56	39	37,416
58	39	28,08
61	38	23,008
62	38	6,592
63	39	34,136
64	39	23,8
65	39	21,84
69	39	30,968
71	38	31,672
72	39	22,176
76	38	21,248
78	39	29,88
79	39	11,824
82	38	18,928

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Temperatura Reactor 2.

Días	Temperatura (°C)	Volumen biogás (L)	Días	Temperatura (°C)	Volumen biogás (L)
1	36	0	41	38	1,664
2	39	1,74	42	38	32,168
5	38	10,184	43	39	16,456
7	35	5,964	44	39	49,416
9	36	11,822	47	39	15,608
12	30	9,63	48	39	2,048
13	31	12,046	50	40	57,832
14	32	12,654	51	39	20,28
15	35	17,1	54	39	27,576
16	36	10,6	56	38	18,432
20	37	11,462	58	39	64,784
21	38	3,238	61	40	30,848
22	40	19,332	62	38	1,12
23	40	14,408	63	39	35,88
26	38	11,608	64	39	31,936
27	37	1,432	65	39	24,16
29	39	32,104	69	39	27,512
33	38	73,84	71	38	65,76
34	39	0,248	72	39	20,328
35	40	17,96	76	38	14,136
36	39	18,72	78	39	14,12
40	39	16,592	79	39	34,976
			82	38	15,6
			83	38	8,792

Fuente: elaboración propia.

ANEXO C.

SÓLIDOS TOTALES, SÓLIDOS VOLÁTILES, SÓLIDOS FIJOS Y HUMEDAD.

Artículo/ tesis	Resumen	Sólidos totales	Resultados
<p>Digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Germán López Martínez 2004</p>	<p>Se utilizó residuos urbanos como sustrato donde las variables de proceso fueron el contenido de sólidos totales y adición o no de inóculo.</p>	<p>Se estudiaron 7 muestras las cuales 3 contenían inóculo y su contenido de sólidos totales fue de 20%, 35% y 50%, otras 3 muestras no contenían inóculo y presentaban los mismos contenidos de sólidos totales y por último, la muestra 7 fue analizada como un blanco.</p>	<p>Se concluyó que el contenido de sólidos no incide sobre el tiempo de retención, el factor directamente relacionado es el inóculo ya que disminuye el tiempo de retención del sistema</p>
<p>Anaerobic digestion of brewery primary sludge to enhance bioenergy. Matthew T. Agler. 2009</p>	<p>Se utilizó las aguas residuales de una fábrica de cerveza en forma de lodo primario para la investigación de su potencial como fuente de energía (metano)</p>	<p>Se estudiaron dos tipos de reactores, un digestor anaerobio continuamente agitado (CSAD) y un digestor por lotes (ASBR) con 21 diferentes sustratos donde se pudo evidenciar que la cantidad de sólidos volátiles generados se mantuvo en un rango de 24% a 60%</p>	<p>Se concluyó que la disminución de los tiempos de retención dio como resultado un aumento de las concentraciones de efluentes de VS a 21.76 y 19.85 g/l y la disminución de las eficiencias de eliminación de VS a 46.8% y 52.2% en la CSAD y ASBR en el día 136 del período de operación, respectivamente</p>

Fórmula de sólidos totales:

$$ST (mg/L) = \frac{(W_{110^{\circ}C} - W_{crisol\ vacio}) * 1000}{Volumen\ de\ muestra}$$
$$\%ST = \frac{(W_{110^{\circ}C} - W_{crisol\ vacio}) * 100}{W_{Crisol\ muestra} - W_{Crisol\ vacio}}$$

Fórmula de sólidos volátiles:

$$SV (mg/L) = \frac{(W_{110^{\circ}C} - W_{500^{\circ}C}) * 1000}{Volumen\ de\ muestra}$$
$$\%SV = \frac{(W_{110^{\circ}C} - W_{500^{\circ}C}) * 100}{W_{Crisol\ muestra} - W_{Crisol\ vacio}}$$

Fórmula de sólidos fijos:

$$SF (mg/L) = \frac{(W_{500^{\circ}C} - W_{crisol\ vacio}) * 1000}{Volumen\ de\ muestra}$$
$$\%SF = \frac{(W_{500^{\circ}C} - W_{crisol\ vacio}) * 100}{W_{110^{\circ}C} - W_{Crisol\ vacio}}$$

Fórmula de humedad:

$$HUMEDAD = 100 - \text{Sólidos totales}$$

Los pasos necesarios para hallar estos parámetros fueron los siguientes:

1. Se seleccionan los cuatro crisoles para las cuatro muestras y se pesan en una balanza analítica para poder tener el peso inicial de estos (*peso crisol vacío*).

Ilustración 5. Crisol de porcelana.



Fuente: elaboración propia.

2. Luego se le agrega 10 mL de cada muestra (lodos digeridos de los dos reactores y lodos centrifugados de cada reactor) y se pesan nuevamente. (*peso crisol muestra*)
3. Siguiendo a esto se pesan de nuevo los crisoles y se introducen a las muflas a una temperatura de 110°C.

Ilustración 6. Horno de secado.



Fuente: elaboración propia.

4. Después de permanecer 3 horas en la mufla se retiran las muestras y se dejan enfriar por 1 hora para poder pesarlas y conocer los sólidos totales de los lodos digeridos y centrifugados. (*peso 110°C*)
5. Se vuelven a ingresar los crisoles a la mufla, pero esta vez a una temperatura de 500°C para poder obtener la cantidad de sólidos volátiles presentes en las muestras
6. Por último, se pesan los crisoles y se registran los datos obtenidos. (*peso 500°C*)

Tabla 11. Porcentaje de sólidos totales y fijos de los reactores 1 y 2 respectivamente.

	REACTOR 1				REACTOR 2			
	%Sólidos totales		% Sólidos Volátiles		%Sólidos totales		% Sólidos Volátiles	
	R1-N	R1-C	R1-N	R1-C	R2-N	R2-C	R2-N	R2-C
	0,195082	0,066436	0,713278	0,854315	1,858237	0,114382	0,519257	0,029097
	21	17	26	19	55	04	91	18
	0,319383	0,056544	1,543500	0,538480	2,598405	0,232364	1,605575	0,079415
	96	94	47	3	46	33	89	66
	0,067662	0,070961	0,739022	0,768244	3,190841	0,406597	1,949447	0,200988
	35	53	81	42	27	98	69	77
	0,197665	0,029721	1,241157	0,116771	2,188014	0,292807	1,137974	0,113177
	23	92	93	58	03	53	2	38

	0,178241 15	0,015920 84	1,667165 52	0,154524 48	2,688620 26	0,234013 38	1,590940 67	0,198962 92
	0,163673 26	0,028979 85	0,272943 71	0,173311 97	1,863790 52	0,174492 07	0,773014 76	0,151427 02
	0,176307 69	0,019519 33	1,387106 08	0,169477 93	1,955732 28	0,252914 56	1,331886 15	0,173311 97
	0,191590 71	0,074272 67	2,270189 8	0,220907 22	3,798512 76	0,482018 61	3,399548 82	0,456869 81
	0,160593	0,020358 83	1,615156 71	0,109907 52	3,446618 95	0,593682 03	2,849992 49	0,072838 3
	0,142859 99	0,050206 94	1,114649 68	0,293977 52	2,015154 45	0,709424 62	1,590911 41	0,472262 32
	0,360412 44	0,041267 41	1,272479 98	0,182633 41	1,916378 06	0,182899 89	1,639311 35	0,134606 1
	0,238951 6	0,064586 8	2,012815 23	0,285902 34	3,080906 41	0,172378 26	2,426590 13	0,035599 86
SUMATO RIA	2,392423 6	0,538777 23	15,84946 62	3,868453 88	30,60121 2	3,847975 29	20,81445 15	2,118557 3

Fuente: elaboración propia.

ANEXO D

TIEMPO DE RETENCIÓN

Artículo/ tesis	Resumen	Tiempo de retención	Resultados
<p>Digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Germán López Martínez 2004</p>	<p>Se utilizó residuos urbanos como sustrato, donde las variables de proceso fueron: contenido de sólidos y adición o no de inóculo.</p>	<p>Se estudiaron 7 muestras las cuales 3 contenían inóculo y su contenido de sólidos totales fueron de 20%, 35% y 50%, otras 3 muestras no contenían inóculo y presentaban mismo contenido de sólidos totales y por último un blanco. Se inicia el experimento y se desea identificar en qué momento se da la velocidad máxima de producción de biogás a partir del tiempo de retención.</p>	<p>Se concluyó que las muestras a las que se adicionó inóculo alcanzaron la velocidad máxima de producción de biogás entre 22 y 27 días mientras que para aquellas muestras sin inóculo se sobrepasó los 50 días.</p>

ANEXO E

PRUEBAS DE NITRATOS, NITRITOS Y FÓSFOROS

- Nitratos:

1. Se toma un vial con 6mL de muestra.

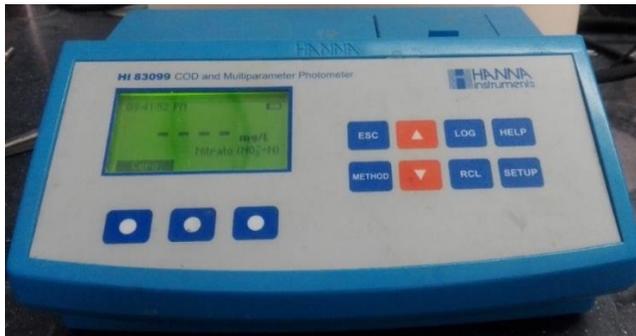
Ilustración 7. Vial de 10 mL



Fuente: elaboración propia.

2. Se ingresa el vial en el equipo y se selecciona el método "Nitrato" y se lee el "cero"

Ilustración 8. Equipo HANNA para medición de nitratos.



Fuente: elaboración propia.

3. Posteriormente se saca el vial y se le introduce el "reagente Nitrato", se agita 3 o 5 veces, con sumo cuidado de que no se riegue la muestra debido a la reacción que se realiza en el vial.

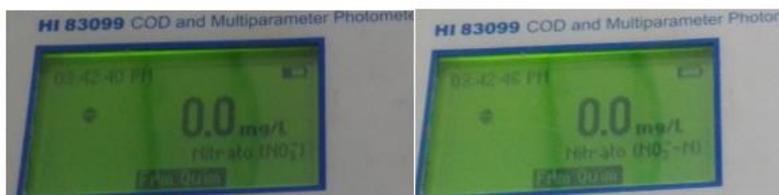
Ilustración 9. Reagente de nitrato.



Fuente: elaboración propia.

4. Se vuelve a meter el vial en el equipo y se le da click en el botón de “Crono”, donde durará cerca de 5 minutos, en la lectura de cada muestra.
5. Luego de transcurridos los 5 minutos, nos aportará los datos de (NO_3^- y de NO_3^- -N)

Ilustración 10. Parámetros de nitrato medidos por el equipo HANNA.



Fuente: elaboración propia.

- Nitritos:

1. Se toma un vial con 10mL de muestra.
2. Se ingresa el vial en el equipo y se selecciona el método “Nitrito HR” y se lee el “cero”

Ilustración 11. Equipo HANNA para medición de nitritos.



Fuente: elaboración propia.

3. Posteriormente se saca el vial y se le introduce el “reagente Nitrito HR”, se agita 3 o 5 veces, con sumo cuidado de que no se riegue la muestra debido a la reacción que se realiza en el vial.

Ilustración 12.
Reagente de nitrito.



Fuente: elaboración propia.

4. Se vuelve a meter el vial en el equipo y se le da click en el botón de “Crono”, donde durará 10 minutos, en la lectura de cada muestra.

5. Luego de transcurridos los 10 minutos, nos aportará los datos de (NO_2^- , de NO_2^- -N y de NaNO_2)

Ilustración 13. Parámetros de nitritos medidos por el equipo HANNA.



Fuente: elaboración propia.

- Fósforo:

1. Se toma un vial con 10mL de muestra.

2. Se ingresa el vial en el equipo y se selecciona el método “Fósforo” y se lee el “cero”.

Ilustración 14. Equipo HANNA para medición de fósforos.



Fuente: elaboración propia.

3. Posteriormente se saca el vial y se le introduce primero el “Reagente Fósforo A”, aplicando 10 gotas de este, luego de ello si se introduce el “Reagente Fósforo B”, se agita 3 o 5 veces, con sumo cuidado de que no se riegue la muestra debido a la reacción que se realiza en el vial.

Ilustración 15. Reagente A y B para fósforos.



Fuente: elaboración propia.

4. Se vuelve a meter el vial en el equipo y se le da click en el botón de “Crono”, donde durará 10 minutos, en la lectura de cada muestra.
5. Luego de transcurridos los 10 minutos, nos aportará los datos de (P, de PO_4^{3-} y de P_2O_5).

ANEXO F

PRUEBAS DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

1. Se toma un vial de muestra DQO HR.

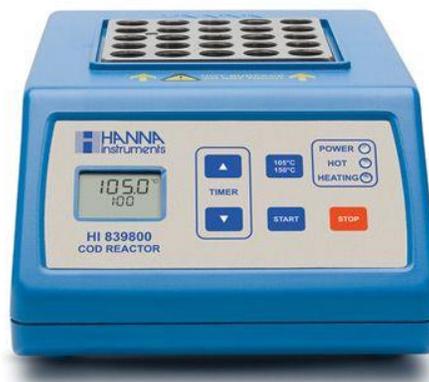
Ilustración 16. Vial de rango alto para medición de DQO.



Fuente: elaboración propia.

2. Se añaden 0.2 mL de muestra en el vial, teniendo en cuenta de aplicar un vial con 0,2 mL de agua, para que este sea el blanco de muestra.
3. Se deja el equipo en acondicionamiento hasta 150°C.
4. Se pone en digestión las muestras tomadas en el Reactor COD durante 2 horas.

Ilustración 17. Reactor COD.



Fuente: elaboración propia.

5. Luego de la digestión se dejan enfriar los viales y se procede a usar el multiparámetro HANNA, con el método DQO HR (rango alto). Allí se introduce el vial etiquetado como “blanco” y se lee el “cero”

Ilustración 18. Equipo HANNA para medición de DQO.



Fuente: elaboración propia.

6. Luego de ser leído el cero, se introducen los viales de muestra y se leen en el multiparámetro HANNA.

ANEXO G
INHIBIDORES

Tabla 12. Concentraciones de inhibidores que afectan la producción de biogás.

Inhibidor	Concentración inhibidora
SO ₄	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Nitrato	0.05 mg/mL
Cu	100 mg/L
Cr	200 mg/L
Ni	200-500 mg/L
CN	25 mg/L
Detergente	20-40 mg/L
Na	3500-5500 mg/L
K	2500-4500 mg/L
Ca	2500-4500 mg/L

Fuente: OLAYA ARBOLEDA Jeison, GONZÁLEZ SALCEDO Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Universidad nacional de Colombia sede Palmira. Palmira. Julio de 2009.

ANEXO H

EDAD Y PROPORCIÓN EN PORCENTAJE QUE SE AGREGA DE MATERIAL INOCULADOR, EN LA ETAPA DE ARRANQUE DE UN BIODIGESTOR

Tabla 13. Porcentajes de inóculo que deberían ser agregados a los biodigestores según su edad.

Edad (años)	Porcentaje
1	33
2	25
3	20
4	25
5	20
6	5
7	0

Fuente: OLAYA ARBOLEDA Jeison, GONZÁLEZ SALCEDO Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Universidad nacional de Colombia sede Palmira. Palmira. Julio de 2009.

ANEXO I
ANÁLISIS TOC

R1: reactor 1, R2: reactor 2, R1*: reactor 1 centrifugado, R2*: reactor 2 centrifugado

Tabla 14. Primera muestra de TOC.

Lodos primer carbono			
DATOS	TOC (mg)	TC (mg)	IC (mg)
R1-1	2163	2330	166.7
R1-2	2259	2401	142
R2-1	1986	2153	166.3
R2-2	2226	2441	214.6
R1*-1	558.5	558.5	0
R1*-2	308.7	417.8	109.1
R2*-1	328.3	439	110.7
R2*-2	408.5	528.3	119.8

Fuente: elaboración propia.

Tabla 15. Segunda muestra de TOC para sólidos.

Lodos segundo carbono			
DATOS	TOC (mg)	TC (mg)	IC (mg)
R1-1	1616	1877	261.2
R1-2	216.3	13.34	229.6
R2-1	2256	2376	120.1
R2-2	2201	2346	145.5
R1*-1	379.5	474	94.47
R1*-2	453.2	530.6	77.47
R2*-1	446.9	624.2	177.2
R2*-2	323.9	500.5	176.6

Fuente: elaboración propia.

Tabla 16. Tercera muestra de TOC para sólidos.

Lodos tercer carbono			
DATOS	TOC (mg)	TC (mg)	IC (mg)
R1-1	1783	8.757	1792
R1-2	1507	0	1507
R2-1	1174	0	1174
R2-2	0.4649	0.8352	0.5484
R1*-1	402.5	476.7	74.3
R1*-2	304.5	333.1	28.61
R2*-1	294.7	435.3	140.6
R2*-2	310.6	449.4	138.8

Fuente: elaboración propia.

Tabla 17. Cuarta muestra de TOC para sólidos.

Lodos cuarto carbono			
DATOS	TOC (mg)	TC (mg)	IC (mg)
R1-1	4988	4990	1.816
R1-2	1529	2.475	1532
R2-1	759	0.5028	760
R2-2	2309	2388	79.05
R1*-1	322	418.5	96.44
R1*-2	325.3	408	82.71
R2*-1	237.4	349.8	112.5
R2*-2	296.9	393	96.08

Fuente: elaboración propia.

ANEXO J
ENSAYO BPM

Este ensayo fue realizado con el propósito de poder comparar la producción de biogás en reactores batch a menor escala con los reactores CSTR que se estaban usando y que tan factible es usar este tipo de reactores. Este procedimiento fue efectuado en las últimas semanas del proyecto por lo que los resultados que arrojó este ensayo no son suficientes aun para poderlos comparar con los resultados de los reactores. El ensayo PBM consiste en incubar muestras orgánicas inoculadas con bacterias anaeróbicas durante un periodo de 30 días. La temperatura de incubación es generalmente de 35°C, pero puede variar según el sistema que se está considerando. Usualmente se analizan las proporciones de aguas residuales múltiples a un inóculo. La producción de biogás se monitorea a lo largo de la prueba y el biogás se analiza para determinar el contenido de CH₄. Los requisitos básicos para un PBM incluyen un inóculo anaeróbico, botellas de ensayo de (100 ml) con tabiques, gas nitrógeno, una incubadora, un agitador, una jeringa de gas y un método para analizar el CH₄.

Tabla 18. Cantidades máxicas de macronutrientes para una concentración de 0.25L.

	Compuestos	Unidades	Concentración (0.25L)
Micronutrientes	NH ₄ Cl	g	0.05
	KCl	g	0.025
	MgCl ₂ ·6H ₂ O	g	0.015
	KH ₂ PO ₄	g	0.0345
	FeCl ₃ ·6H ₂ O	g	0.05
	MnCl ₂ ·4H ₂ O	g	0.001
	COCl ₂ ·6H ₂ O	g	0.0025
	NiCl ₂ ·H ₂ O	g	0.0025
	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	g	0.000125
	CuCl ₂ ·2H ₂ O	g	0.00012500

Tabla 19 (Continuación)

	Compuestos	Unidades	Concentración (0.25L)
Micronutrientes	CaCl ₂ ·2H ₂ O	g	0.025
	KI	g	0.0025
	H ₃ BO ₃	g	0.000125
	NaHCO ₃	g	1.05

Fuente: elaboración propia basado en OWEN W.F, et al. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicit.1979.

Tabla 19. Dirección de macronutrientes para hacer 0.25L de sustrato para alimentar el inóculo.

	Compuestos	Unidades	Concentración (0.25L)
Macronutrientes	Glucosa	g	0.1
	Celulosa	g	0.1
	Caseína	g	0.1
	Acetato de sodio	g	0.1
	Aceite de cocina	ml	0.1

Fuente: elaboración propia.

Configuración del ensayo: El primer paso es determinar los SV del lodo residual a ensayar. La concentración de SV del inóculo variará con el tiempo, por eso se debe medirse antes de comenzar cada ensayo. Usando la concentración de SV, se puede determinar la cantidad de residuos y el inóculo que se agregará a la botella de ensayo. El objetivo es obtener una tasa de producción de CH₄ medible, pero no excesiva, para el monitoreo durante el ensayo. Las relaciones de sustrato a inóculo seleccionadas para una botella de ensayo PBM pueden variar, en este caso se usarán concentraciones de 1g sustrato/ 1000 ppm.

Para una botella de ensayo de 100 ml, el volumen de líquido debe ser de 50 ml. se puede alcanzar este volumen agregando el inoculo y el sustrato, cada ensayo debe realizarse por triplicado. Es necesario asegurar que la producción de CH₄ no esté limitada por el sustrato o la disponibilidad de inóculo. Después del llenado, el

espacio de la cabeza sobre el líquido en las botellas de purga con 100% de gas N₂ para mejorar la condición anaeróbica en la botella, a continuación, se sella la botella con un septo de goma y se coloca en un agitador (150-200 rpm) en un lugar con temperatura controlada a 39 °C. Para medir el biogás se debe insertar una aguja en el tabique y permitir que la misma presión del gas en la botella desplace el émbolo de la jeringa para poder registrar el volumen desplazado.

Ilustración 19. Botellas de ensayo con lodos activados en un medio anaeróbico.



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 20. Obtención del volumen del biogás.

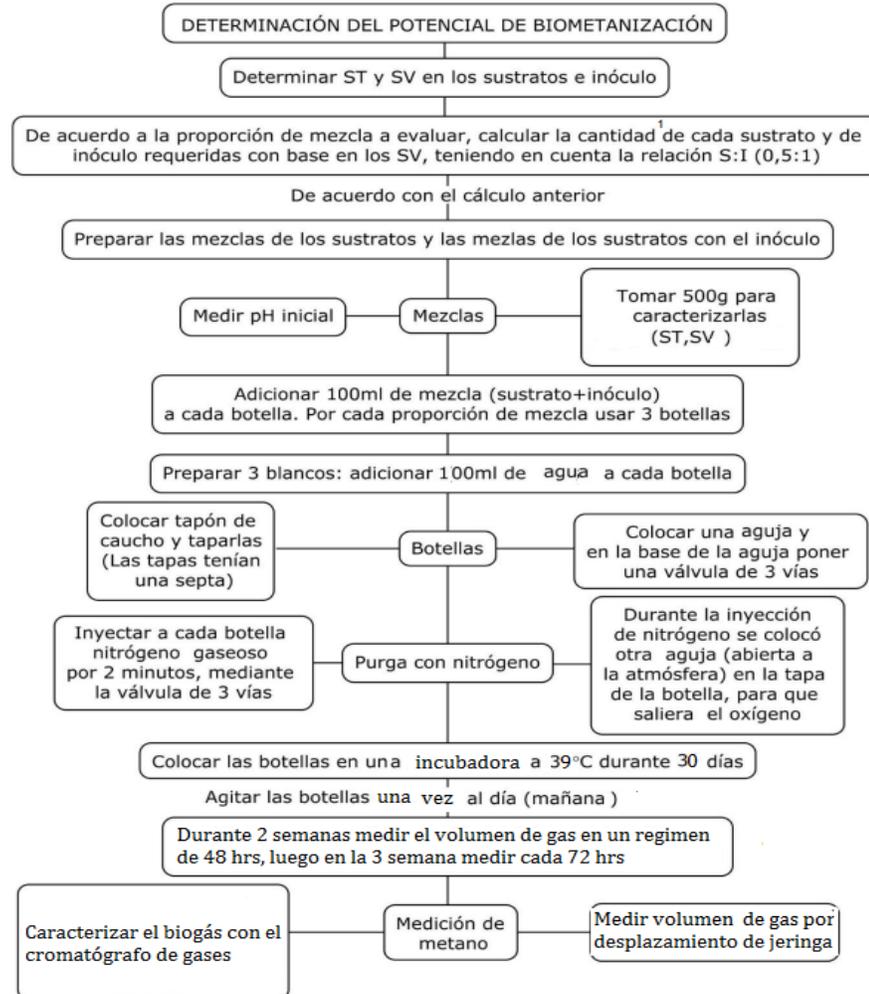


Fuente: elaboración propia.

También se quería comprobar la producción de biogás en los reactores a escala real con diferentes concentraciones de solución de sustrato, por eso para el

desarrollo de la inclusión del inoculo se decidió que el reactor 1 iba a contener una concentración de 350 ppm y el reactor 2 una concentración de 1000 ppm para hacer una comparación en la producción de biogás.

Diagrama 3. Esquema del procedimiento para determinar el potencial de biometanización de un determinado sustrato.



Fuente: elaboración propia.

CROMATOGRAFIA:

Para la lectura del gas por medio de cromatografía en los ensayos BMP, el procedimiento fue similar al de los reactores CSTR, se adecuó de una septa en sus válvulas de 3 vías, con el fin de que el biogás contenido en la jeringa de desplazamiento, se pudiera succionar un volumen de 1mL, y así poder inyectarlo en el cromatógrafo, con las mismas consideraciones realizadas para las mediciones de los reactores 1 y 2, y así obtener los resultados que serán discutidos más adelante.

RESULTADOS:

Así mismo, se tomaron muestras de desplazamiento volumétricas de los ensayos BPM para poder obtener un estimado de producción de biogás en reactores a escala laboratorio y poder comparar los resultados con los reactores de 15 L, los resultados de estos volúmenes, se muestran en la siguiente tabla:

Figura 23. Concentración volumétrica de metano en ensayos BMP.

Día	Contenedor	R1-con1	R1-con2	R1-con3	R2-con1	R2-con2	R2-con3	R1-sin1	R1-sin2	R1-sin3	R2-sin1	R2-sin2
1	Volumen (ml)	--	11.5	--	23	32	36.5	12.5	13	13	14.5	11.5
2		--	--	--	--	4	6	--	--	--	--	--
3		3.5	--	--	6	2.5	--	3.5	3	3.5	2.5	--
4		2.5	2.5	3	4	--	--	2.5	2	2	1	1
5		3.5	3	--	5.5	--	--	4	4.5	3.5	3.5	2
6		5.5	4	2	6.5	--	--	8	6.5	6.5	5	2.5
7		--	--	2	2.5	6	1.5	--	6.5	3.5	2.5	2
8		--	2	--	--	1.5	--	7.5	8	--	2.5	4
9		--	5	--	1.5	3.5	--	9	8	--	3	4
10		--	2	--	1.5	--	--	8	7.5	--	4.5	4.5

Fuente: elaboración propia.

Como se resume en la tabla anterior, para algunos días, algunos ensayos producían biogás y otros no, probablemente a su corto tiempo de retención. Al igual que en los reactores 1 y 2, a estos ensayos se les realizaron pruebas de cromatografía para la medida de metano, pero debido al corto tiempo de incubación los datos obtenidos contenían un porcentaje mínimo. Los resultados fueron los siguientes:

Figura 24. Porcentaje de metano para los ensayos de BMP.

# Prueba	Unidad de medida	R1-con1	R1-con2	R1-con3	R2-con1	R2-con2	R2-con3	R1-sin1	R1-sin2	R1-sin3	R2-sin1	R2-sin2
1	% metano	8.611	7.539	7.968	7.279	9.546	7.214	10.692	10.071	10.354	9.595	8.737
2		--	9.216	--	7.367	8.006	--	13.472	17.135	8.932	7.683	8.299
3		--	--	--	--	--	--	--	8.796	--	--	--

Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos por los ensayos satisficieron las expectativas del proyecto, ya que demostraron resultados similares a los reactores CSTR de mayor escala, obteniendo así que el reactor 1 producía un porcentaje mayor en metano que el reactor 2 e indicando que procesos en reactores batch son muy funcionales y de menores costos.