

EVALUACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE LA DIGESTIÓN
ANAEROBIA DE LOS RESIDUOS DE FRUTA GENERADOS POR UNA
EMPRESA DE ALIMENTOS A ESCALA LABORATORIO

KAREN JOHANNA ESCARRAGA PARRA
NICOLAS ESPINOSA GONZALEZ

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

EVALUACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE LA DIGESTIÓN
ANAEROBIA DE LOS RESIDUOS DE FRUTA GENERADOS POR UNA
EMPRESA DE ALIMENTOS A ESCALA LABORATORIO

KAREN JOHANNA ESCARRAGA PARRA
NICOLAS ESPINOSA GONZALEZ

Proyecto integrado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO

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

NOTA DE ACEPTACIÓN

Juan Camilo Cely Garzón

Diana Milena Morales Fonseca

Bogotá D.C., Julio 2020

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJIA GUZMÁN

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa Ingeniería Química

Ing. IVÁN RAMÍREZ MARÍN

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

Dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mi pequeño hermano por ser el motor principal de mi vida, motivarme constantemente a ser alguien mejor y darme su amor incondicional.

A mis padres por ser mis confidentes y mis amigos, por apoyarme infinitamente, tanto en la realización de este trabajo como en todos los aspectos de mi vida, por permitirme educarme y demostrarme su amor en cada uno de sus esfuerzos.

A esa persona que ya no está conmigo en este mundo, pero estará siempre en mi corazón; tus enseñanzas pautaron mi concepción de la vida y mi propósito en ella.

A mi compañero, por su esmero y dedicación durante la realización de este trabajo, pero también por permitirme conocerlo mejor; no tengo dudas de la gran persona que es y el gran profesional que será.

A cada una de las personas que hicieron parte mi proceso de formación académica, a mis educadores, compañeros y amigos por hacer de esta experiencia la más enriquecedora y gratificante.

Karen Johanna Escárraga Parra

A toda mi familia por su apoyo incondicional en cada momento de mi vida.

A mi mamá por su amor infinito, dedicación y sacrificio constante; por ser mi principal guía, consejera y fuente de motivación.

A mi papá por su amor absoluto, inteligencia e integridad; por todos sus consejos y recomendaciones a la hora de realizar este trabajo y en todos los aspectos de mi vida, siendo mi principal modelo a seguir.

A mi hermana por su cariño, alegría y nobleza, demostrándome cada día que también podemos aprender de los más pequeños.

A mi compañera de tesis por su intelecto, entrega y esfuerzo; dedico este trabajo de grado especialmente a todos los momentos que compartimos a la hora de realizarlo.

Finalmente, a todos los compañeros, docentes y amigos que participaron en mi proceso académico y personal durante el transcurso de mi periodo universitario.

Nicolás Espinosa González

AGRADECIMIENTOS

A las ingenieras Alejandra Babativa, Alexandra Flórez y Carolina Quintero por abrirnos la posibilidad de realizar nuestro trabajo de grado en la empresa de alimentos, a su vez de brindarnos todos los datos, instalaciones y parte de las materias primas necesarias para desarrollar el mismo.

Al profesor Harvey Andrés Milquez Sanabria, por todos sus conocimientos y aportes, los cuales fueron una importante ayuda y punto de referencia para concluir nuestro trabajo de grado.

Al director de programa Iván Ramírez Marín por su gestión en cuanto al desarrollo y finalización de los trabajos de grado de la Universidad de América, debido a las circunstancias generadas por la pandemia del COVID-19.

A nuestras familias, por brindarnos la posibilidad y los medios necesarios para iniciar nuestra carrera universitaria, por sus consejos y apoyo incondicional durante todo este periodo.

A los profesores de la Universidad de América, por su deseo de enseñarnos, corregirnos y guiarnos en cada una de las materias cursadas a lo largo de este ciclo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	22
OBJETIVOS	23
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	24
1.1 MATERIA PRIMA	24
1.1.1 Residuos Orgánicos	24
1.1.1.1 Origen animal	24
1.1.1.2 Origen vegetal.	25
1.1.2 Frutas	25
1.1.3 Inóculo	26
1.2 DIGESTIÓN ANAEROBIA	27
1.2.1 Hidrólisis	28
1.2.2 Acidogénesis	29
1.2.3 Acetogénesis	29
1.2.4 Metanogénesis.	29
1.3 FACTORES QUE AFECTAN LA DIGESTIÓN	30
1.3.1 Humedad y sólidos totales	30
1.3.2 pH.	31
1.3.3 Alcalinidad	31
1.3.4 Ácidos grasos volátiles	32
1.3.5 Temperatura	32
1.3.6 Velocidad de carga orgánica	33
1.3.7 Contenido de carbono y nitrógeno	33
1.3.8 Macronutrientes y micronutrientes	34
1.3.9 Demanda Química de oxígeno	34
1.3.10 Inhibidores del proceso	35
1.4 TIPOS DE REACTORES	36
1.4.1 Reactor tipo Batch	36
1.4.2 Reactores CSTR	37
1.4.3 Reactores de contacto	37
1.4.4 Filtros anaeróbicos	38
1.4.5 Reactor de lecho fluidizado (AFBR) y de lecho expandido (AEBR)	39
1.4.6 Reactores UASB	39
2. METODOLOGÍA	41
2.1 SELECCIÓN DE LA MEZCLA DE RESIDUOS	42
2.1.1 Matriz de selección.	42
2.1.1.1 Disponibilidad del recurso y rendimiento del residuo	42
2.1.1.2 Pretratamientos que se le deben realizar al residuo	43
2.1.1.3 Análisis fisicoquímicos	43

2.1.1.4	Revisión bibliográfica de los parámetros teóricos	43
2.2	DISEÑO DE EXPERIMENTOS	44
2.2.1	Etapa 1	44
2.2.1.1	Variables	44
2.2.1.2	Niveles de la variable independiente a modificar	44
2.2.1.3	Número de tratamientos	45
2.2.2	Etapa 2	46
2.2.2.1	Variables	46
2.2.2.2	Niveles de la variable independiente a modificar	46
2.2.2.3	Número de tratamientos	46
2.3	ELABORACION DE LAS MEZCLAS FINALES PARA EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	47
2.3.1	Etapa 1	47
2.3.1.1	Acondicionamiento del sustrato	47
2.3.1.2	Adición de estiércol Bovino	48
2.3.2	Etapa 2	49
2.3.2.1	Adición de Inóculo	49
2.3.2.2	Adición de Solución Reductora	49
2.3.2.3	Adición de Medio Mineral	50
2.4	SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA	50
2.4.1	Acondicionamiento de los reactores	51
2.4.1.1	Montaje individual	51
2.4.1.2	Montaje colectivo	55
2.5	DIGESTION ANAEROBIA	57
2.5.1	Temperatura.	57
2.5.2	Tiempo de retención hidráulico	58
2.5.3	pH	58
2.5.4	Ácidos Grasos Volátiles y Alcalinidad (AGV´s y TAC)	58
2.6	CUANTIFICACIÓN TEÓRICA DE METANO (DETERMINACION CANTIDAD DE BIOGAS GENERADO Y LA COMPOSICION DE METANO)	59
2.6.1	Método Volumétrico por Desplazamiento de Agua	59
2.6.2	Prueba de inflamabilidad	59
2.6.3	Método Volumétrico para la determinación de la composición de metano en el biogás	60
2.6.4	Evaluación teórica del contenido de metano	61
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	64
3.1	SELECCIÓN DE LA MEZCLA DE RESIDUOS	64
3.1.1	Matriz de selección	64
3.1.1.1	Disponibilidad de los recursos	66
3.1.1.2	Rendimiento del residuo	66
3.1.1.3	Pretratamientos que se le deben realizar al residuo	67
3.1.1.4	Análisis fisicoquímicos (Caracterización)	67
3.1.1.5	Revisión bibliográfica de parámetros teóricos	70

3.1.2	Mezcla de frutas	72
3.2	MEZCLAS FINALES	72
3.2.1	Etapa 1.	72
3.2.1.1	Tamaño de partícula	72
3.2.1.2	Dosis Alcalinizante	73
3.2.1.3	Estiércol animal	74
3.2.1.4	Mezclas finales Etapa 1	75
3.2.2	ETAPA 2.	75
3.2.2.1	Inóculo de lodo granular activado	75
3.2.2.2	Solución Reductora	76
3.2.2.3	Medio Mineral	76
3.2.2.4	Mezclas finales Etapa 2	78
3.3	CONDICIONES DE OPERACIÓN	79
3.3.1	Acondicionamiento del reactor	79
3.3.2	Tiempo de retención hidráulico	80
3.4	DIGESTIÓN ANAEROBIA	80
3.4.1	Etapa 1	81
3.4.1.1	Temperatura	81
3.4.1.2	pH	83
3.4.1.3	Ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (TAC)	84
3.4.2	Etapa 2	86
3.4.2.1	Temperatura	86
3.4.2.2	pH	88
3.4.2.3	Ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (TAC)	89
3.4.3	Factibilidad del proceso de digestión anaerobia a partir de residuos cítricos	91
3.5	CUANTIFICACIÓN DE BIOGAS Y METANO	93
3.5.1	Método Volumétrico por desplazamiento de Agua	93
3.5.2	Prueba de inflamabilidad	94
3.5.3	Método Volumétrico para la determinación de la composición de metano en el biogás	95
3.5.4	Evaluación teórica del contenido de metano	96
4.	CONCLUSIONES	99
5.	RECOMENDACIONES	101
	BIBLIOGRAFÍA	103
	ANEXOS	110

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Funcionamiento de reactor anaerobico de contacto	38
Ilustración 2. Filtros anaeróbicos: (A) De flujo ascendente; (B) De flujo descendente; (C) De alimentación múltiple.	38
Ilustración 3. Reactores de lecho expandido y fluidizado	39
Ilustración 4. Funcionamiento reactor UASB	40
Ilustración 5. Montaje experimental ETAPA 1	45
Ilustración 6. Montaje experimental ETAPA 2	47
Ilustración 7. Adición de bicarbonato	48
Ilustración 8. Metodo de desplazamiento volumetrico	51
Ilustración 9. Adaptacion del Reactor de Vidrio Montaje Experimental	52
Ilustración 10. Recipiente plastico para la medicion del gas por desplazamiento de agua	53
Ilustración 11. Bolsa Colectora de gases montaje individual	53
Ilustración 12. Conexiones de tuberia PVC de los elementos del montaje experimental	54
Ilustración 13. Montaje individual	55
Ilustración 14. Incubadora de poliestireno del montaje colectivo	55
Ilustración 15. Termostato W1209 e instalacion del sistema de calentamiento en incubadora	56
Ilustración 16. Montaje colectivo	57
Ilustración 17. Metodo volumetrico composicion de metano en el biogas	60
Ilustración 18. Montajes experimentales para la determinacion de la composicion de metano en el biogas.	61
Ilustración 19. Residuos de fruta	64
Ilustración 20. Disminución del tamaño de partícula Mezcla 1:2	72
Ilustración 21. Muestra de Lodo granular-Inoculo ETAPA 2	76
Ilustración 22. Disposición de componentes ETAPA 2	79
Ilustración 23. Metodo Volumetrico mediante probeta invertida	94
Ilustración 24. Prueba de inflamabilidad Experimento 1	95
Ilustración 25. Prueba de inflamabilidad Experimento 2	95
Ilustración 26. Sólidos totales cítricos.	114
Ilustración 27. Tramos de Tuberia Montaje Experimental	117
Ilustración 28. Tuberia Montaje Individual	118
Ilustración 29. Indicaciones Montaje Experimental cuantificacion metano (alto contenido)	121
Ilustración 30. Indicaciones Montaje Experimental cuantificacion metano (bajo contenido)	122

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Consumo cítricos en Colombia	26
Tabla 2. Reacciones involucradas en la digestión anaerobia	30
Tabla 3. Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación anaeróbica	33
Tabla 4. Principales compuestos requeridos en la digestión anaerobia	35
Tabla 5. Concentración de sustancias inhibitoras	36
Tabla 6. Mezclas Diseño de Experimentos Etapa 1	45
Tabla 7. Mezclas Diseño de Experimentos Etapa 2	46
Tabla 8. Especificación técnica Termómetro de Sonda	57
Tabla 9. Especificación Técnica medidor de pH	58
Tabla 10. Parámetros matriz de selección y porcentajes	65
Tabla 11. Matriz de selección	65
Tabla 12. Kg de residuos producidos durante el primer semestre de 2020	66
Tabla 13. Porcentaje de residuos sólidos en cítricos	67
Tabla 14. Micronutrientes de Cítricos	70
Tabla 15. Relación C:N y Material Volátil de Residuos de frutas cítricas	71
Tabla 16. Composición de las mezclas empleadas en la ETAPA 1.	75
Tabla 17. Composición de las mezclas empleadas en la ETAPA 2.	78
Tabla 18. Acondicionamiento del reactor	79
Tabla 19. Rendimiento máximo de metano de diversos sustratos vegetales	91
Tabla 20. Porcentaje de Metano en el biogás ETAPA 2	96
Tabla 21. Composición elemental de residuos orgánicos	96
Tabla 22. Resultados potencial de producción de biogás y metano.	97
Tabla 23. Metano teórico	97
Tabla 24. Determinación AGVs y Alcalinidad	111
Tabla 25. Costos Montajes	119
Tabla 26. Resultados para ácidos grasos volátiles y alcalinidad	123
Tabla 27. Pesos y porcentaje de sólidos totales de las muestras para determinación de sólidos totales.	123
Tabla 28. Resultados Etapa 1 Experimento Original	124
Tabla 29. Resultados Etapa 1 Experimento Réplica	127
Tabla 30. Resultados Etapa 2	131
Tabla 31. Resultados Experimentales %Metano Experimento Original ETAPA 2	134
Tabla 32. Resultados Experimentales %Metano Experimento Réplica ETAPA 2	134
Tabla 33. Coeficientes a,b,c,d de Buswell	135

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Jerarquía de la recuperación de alimentos	25
Figura 2. Reacciones químicas durante la digestión anaerobia	28
Figura 3. Clasificación de los reactores anaeróbicos	37
Figura 4. Metodología general del proyecto	41
Figura 5. Acondicionamiento de sustrato	48

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Gráfica 1. Acidos grasos presentes en mezclas de cítricos y agua	68
Gráfica 2. Alcalinidad de mezclas de frutas cítricas y agua	69
Gráfica 3. Sólidos totales de mezclas de frutas cítricas y agua	70
Gráfica 4. Dosis Alcalinizante empleada al inicio de la ETAPA 1	73
Gráfica 5. Temperatura fase gaseosa ETAPA 1	82
Gráfica 6. Temperatura fase liquida (mezcla) ETAPA 1	83
Gráfica 7. Valores de pH ETAPA 1	84
Gráfica 8. Relacion AGV/TAC Etapa 1	85
Gráfica 9. Temperatura fase gaseosa ETAPA 2	87
Gráfica 10. Temperatura fase liquida (mezcla) ETAPA 2	88
Gráfica 11. Valores de pH ETAPA 2	89
Gráfica 12. Relacion AGV/TAC Etapa 2	90

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Contenido de solidos totales	31
Ecuación 2. Determinación Relación Carbono-Nitrógeno	34
Ecuación 3. Calculo de rendimiento	42
Ecuación 4. Diseño de Experimentos ETAPA 1	45
Ecuación 5. Diseño de Experimentos ETAPA 2	47
Ecuación 6. Volumen solucion Reductora	50
Ecuación 7. Volumen solución medio mineral sintetico	50
Ecuación 8. Tiempo de retencion hidraulico	58
Ecuación 9. Ecuación general de Buswell	61
Ecuación 10. Cálculo coeficientes de Buswell	62
Ecuación 11. Sistema de ecuaciones para coeficientes estequiométricos	62
Ecuación 12. Calculo de cantidad teórica de biogas y metano producidos.	63
Ecuación 13 Porcentaje de Solidos Totales	114

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Protocolo para la determinación de ácidos grasos volátiles y alcalinidad	111
Anexo B. Protocolo para la determinación de sólidos totales.	113
Anexo C. Preparación del medio mineral y solución reductora.	115
Anexo D. Construcción de tubería montajes experimentales.	116
Anexo E. Instrumentos y materiales para la construcción de los montajes experimentales.	119
Anexo F. Construcción del montaje para la cuantificación de metano.	120
Anexo G. Resultados obtenidos para la determinación de ácidos grasos volátiles, alcalinidad y sólidos totales.	123
Anexo H. Resultados obtenidos para la primera etapa.	124
Anexo I. Resultados obtenidos para la segunda etapa.	131
Anexo J. Resultados experimentales porcentaje de metano en el biogás.	134
Anexo K. Cálculo y resultados de contenido de metano.	135

ABREVIATURIAS

AGV's	Ácidos Grasos Volátiles
Bo-gas	Producción de biogás en m ³ /kg
Bo-methane	Producción de metano en m ³ /kg
CaCO₃/l	Carbonato de Calcio por litro
C/N	Relación Carbono Nitrógeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
ΔG°	Delta de energía libre de Gibbs
HAc/l	Concentración de ácido acético por litro
Ms	Masa sustrato
Ntrat	Numero de tratamientos
PCH₄	(m ³ Metano/m ³ Biogás)
PM	Peso molecular
PVC	Policloruro de vinilo
R	Relación
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
TAC	Título alcalimétrico completo
TRH	Tiempo de retención hidráulico
V	Volumen
%p/p	Porcentaje peso
%v/v	Porcentaje en volumen

GLOSARIO

ACEITES ESENCIALES: Fracciones líquidas volátiles, generalmente destilables por arrastre con vapor de agua, que contienen las sustancias responsables del aroma de las plantas, generalmente son mezclas complejas de hasta más de 100 componentes que pueden ser: compuestos alifáticos, monoterpenos, sesquiterpenos y fenilpropanos¹.

ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES: Subgrupo de ácidos grasos con cadenas carbonatadas de menos de seis carbonos (ácido acético, propiónico, n-butírico, isobutírico), su volatilidad es debida a la corta cadena carbonatada que poseen². El contenido de ácidos grasos volátiles en el interior de un digestor es uno de los parámetros más útiles en el control del estado metabólico del proceso³.

ALCALINIDAD: Medida de capacidad tampón (buffer) del medio. En el rango de pH de 6 a 8 el principal equilibrio químico que controla la alcalinidad es el dióxido de carbono-bicarbonato⁴.

BIOGÁS: Producto final del proceso de digestión anaerobia, cuenta con un alto potencial energético debido a la predominancia (60-70%) de gas metano (CH₄), que puede ser aprovechado para la generación de calor o combustible⁵.

CARGA ORGÁNICA: Se refiere a la concentración de la mezcla alimentada al digestor, esta carga puede variar dependiendo de los sustratos elegidos y de otros elementos adicionados al proceso digestivo.

DIGESTOR: Dispositivos totalmente herméticos construidos de diferentes tamaños y materiales en donde se introduce material orgánico húmedo que es degradado y transformado por microorganismos en diferentes productos metabólicos tales como el metano.⁶

¹ MARTINEZ, Alejandro. Aceites esenciales. [En línea]. Universidad de Antioquia, Medellín, 2003. p. 1 [Consultado 10 de Junio 2020] Disponible en: http://www.med-informatica.com/OBSERVAMED/Descripciones/AceitesEsencialesUdeA_esencias2001b.pdf

² BOTE, Pedro. Estudio de los efectos del pH extremo por adición de NaOH sobre la producción y calidad del biogás y otros parámetros de la digestión anaerobia. [En línea]. Trabajo fin de Master en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua. Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales. Alicante, España: 2013. p. 5 [Consultado 6 de Marzo 2020] Disponible en: <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm-2013-pedro-bote.pdf>

³ *Ibíd.*, p. 9.

⁴ *Ibíd.*, p. 9.

⁵ CARDENAS-CLEVES, Lina Marcela; PARRA-OROBIO, Brayan Alexis; TORRES-LOZADA, Patricia y VASQUEZ-FRANCO, Carlos Humberto. Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. En: Revista ION [En línea]. Cali, Colombia: Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle, 2016, vol.29, nro.1 p.97 [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-

⁶ GOMEZ, Juan y GARCIA, Angie. Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia [en línea]. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Fundación Universidad de América, Facultad de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Química, Bogotá D.C.: 2016. p. 18. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en Repositorio Educativo Digital Lumieres: <http://hdl.handle.net/20.500.11839/667>

ESTIÉRCOL: Material orgánico compuesto generalmente por heces y orina de animales domésticos. Puede presentarse mezclado con material vegetal como paja, heno o material de cama de los animales. Aunque el estiércol es rico en nitrógeno, fósforo y potasio, comparado con los fertilizantes sintéticos sus contenidos son menores y se encuentran en forma orgánica⁷.

INHIBIDOR: Sustancias tóxicas que pueden afectar y detener completamente los procesos biológicos. En el proceso de digestión anaerobia estas sustancias pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos⁸.

INÓCULO: Compuestos que son adicionados al medio y que contienen toda la carga microbiana necesaria para que proceda el proceso de digestión anaerobia⁹.

NUTRIENTES: Serie de elementos químicos que necesitan captar las bacterias para funcionar correctamente; específicamente en el proceso anaeróbico son necesarios para la síntesis de nueva biomasa¹⁰. De acuerdo a la cantidad requerida del elemento se clasifican en macronutrientes y micronutrientes

SÓLIDOS TOTALES: Se define como la materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103 - 105 °C. El valor de los sólidos totales incluye materias disueltas (sólidos disueltos totales: porción que pasa a través de un filtro) y no disuelto (sólidos suspendidos totales: porción de sólidos totales retenidos por un filtro)¹¹.

SUSTRATO: Material orgánico que es degradado en el proceso de digestión anaerobia; un sustrato ideal debe proveer las necesidades nutricionales que necesitan todos los microorganismos del proceso.

TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH): Según el manual de biogás de la FAO preparado por Varnero¹², el tiempo de retención hidráulico representa el tiempo que permanece una unidad de carga orgánica dentro del digestor anaerobio y es uno de los factores de control en la digestión anaerobia más importantes.

⁷ ROMAN, Pilar; MARTINEZ, María y PANTOJA Alberto. Manual de compostaje del agricultor [en línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Chile: 2013. p.11. [Consultado 5 de Marzo, 2020] Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf> ISBN: 978-92-5-307844-8

⁸ VARNERO, María. Manual del biogás [en línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Chile: 2011. p.46. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>. ISBN: 978-95-306892-0

⁹ ANGELIDAKI, Irini; SANDERS, Wendy. Assessment of the anaerobic biodegradability of macro pollutants. En: Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 3 [En línea] Netherlands, 2004, p.121. [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/225249844_Assessment_of_the_anaerobic_biodegradability_of_macropollutants

¹⁰ VARNERO. Op. Cit. p. 45

¹¹ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Sólidos Totales Secados a 103-105°C. TP0436 [en línea]. Bogotá D.C: IDEAM. 2007. p.2. [Consultado: día 28 de Marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Totales+secados+a+103+-+105%C2%BAC..pdf/d4faab4a-34e4-4159-bf4c-50353b101935>

¹² VARNERO. Op. Cit. p.15.

RESUMEN

El presente trabajo pretende generar una alternativa para el aprovechamiento de cáscaras de frutas cítricas (limón, mandarina y naranja) provenientes de una empresa de alimentos. Se evaluó la generación de un tipo de energía renovable y alternativa como el biogás, el cual es producido a partir de la degradación de la materia orgánica como producto del metabolismo bacteriano, mediante el proceso de digestión anaerobia. Para tal fin, se evaluó experimentalmente la digestión anaerobia en dos etapas con diferentes cargas orgánicas, variando la composición del sustrato y la adición de otros compuestos tales como excreta de origen animal (estiércol bovino) y sustancias minerales, así como la adición de un inóculo de lodo granular proveniente de un reactor metanogénico activo.

Inicialmente se estableció la composición de las mezclas a emplear, mediante una matriz de selección, en la cual se evaluaron aspectos como el rendimiento de la cáscara, disponibilidad del residuo, características fisicoquímicas experimentales y referencias bibliográficas, así como los pretratamientos a realizar. Se estableció una relación de 1:2 de sustrato/estiércol en la primera fase y la cantidad de solución mineral e inóculo a agregar en la segunda.

Una vez seleccionada la composición de las mezclas se construyeron en total doce (12) montajes experimentales y se realizó la digestión anaeróbica en dos etapas: La primera consistió en variar la relación de las mezclas compuestas por residuos cítricos y residuos cítricos-estiércol bovino en proporciones 1:2, 1:3 y 1:4 sustrato/agua (p/p), durante un tiempo de retención de 30 días; para la segunda etapa con tiempo de retención de 20 días se adicionó únicamente a las mezclas con estiércol bovino, un medio mineral junto con un lodo granular activo proveniente de un reactor metanogénico de la planta de tratamiento de agua residual de la empresa.

Finalmente se descartó la producción de biogás de cítricos sin la adición de cosustratos (estiércol bovino) e inóculo y se evaluó el porcentaje experimental de metano obtenido en la segunda fase, mediante la prueba de combustión de llama y el método volumétrico para la determinación de concentración de metano. Se calculó el potencial bioquímico de metano teórico mediante la ecuación de Buswell para los montajes experimentales de la segunda etapa, en donde la mezcla compuesta por residuos cítricos-estiércol bovino y en proporción sustrato/agua 1:2 fue el experimento que obtuvo mayor producción de metano.

Palabras Clave: Digestión-anaerobia, biogás, residuos cítricos.

INTRODUCCIÓN

Durante el procesamiento, distribución y comercialización de alimentos, se generan residuos orgánicos sólidos que tienden a acumularse en rellenos sanitarios. Según el informe de Disposición Final de Residuos Sólidos realizado por la superintendencia de servicios públicos domiciliarios¹³ “*para el año 2017, Colombia dispuso alrededor de 30.081 Ton/día de residuos sólidos*”, únicamente en el relleno sanitario Doña Juana son enterradas diariamente 6.700 toneladas de residuos sólidos¹⁴, “*de las cuales el 53.22% corresponden a residuos orgánicos*”¹⁵. La recolección, transporte y disposición de dichos residuos genera costos por combustible y emisiones liberadas al medio ambiente que poseen un alto contenido energético aprovechable.

El biogás se presenta como una alternativa viable para la reutilización de residuos de fruta ya que es un combustible producido a partir de la degradación de la materia orgánica como producto del metabolismo bacteriano, es obtenido a partir de una materia prima que no tiene costo y que significa un problema para las empresas procesadoras de alimentos, así mismo se caracteriza por su alto poder calorífico por lo cual puede ser usado como combustible para establecer procesos integrales y sostenibles. Al ser un producto que se genera por medios naturales implica una ventaja en su obtención; adicionalmente del biogás generado, los subproductos del proceso pueden llegar a ser utilizados como bio-abono, de tal manera que no se produce desperdicio alguno dentro del proceso de producción.

Este modelo de digestión puede significar un modelo de negocio para satisfacer las necesidades de disposición de residuos sólidos orgánicos, garantizando la gestión sustentable de los principales residuos generados tanto de la presente empresa como de otras con el mismo perfil de problemática.

¹³ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos. [en línea]. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Bogotá D.C. 2018. p.6 [Consultado 19, Septiembre, 2019]. Disponible en: https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2._disposicion_final_de_residuos_solidos_-_informe_2017.pdf

¹⁴ BIOGÁS DOÑA JUANA. Descripción General [Sitio Web]. Bogotá. [Consultado 19, Septiembre, 2019]. Disponible en: <http://biogas.com.co/>

¹⁵ UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE SERVICIOS. Guía Técnica para el aprovechamiento de Residuos Orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura [en línea] Bogotá D.C. 2016. p.7 [Consultado 19, Septiembre, 2019]. Disponible en: http://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP_SR.pdf

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la obtención de biogás mediante la digestión anaerobia de los residuos de fruta generados por una empresa de alimentos a escala laboratorio

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Seleccionar la mezcla de residuos adecuada para ser usada como sustrato en la digestión anaerobia.
2. Acondicionar los reactores y materia prima a las condiciones de operación apropiadas.
3. Realizar el proceso de digestión anaerobia variando la carga orgánica alimentada al reactor.
4. Seleccionar teóricamente la carga orgánica con mayor producción de metano.

1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La producción de biogás se da a partir de los procesos metabólicos de microorganismos que son inhibidos con la presencia de oxígeno, estos procesos son llamados digestión anaerobia. Utilizando este proceso es posible transformar la materia orgánica en biogás, el cual está compuesto principalmente por dióxido de carbono y metano, junto con trazas de otros compuestos. A continuación, se realiza una recopilación de información requerida para comprender la digestión anaerobia, así como los factores y métodos que se deben tener en cuenta durante su realización.

1.1 MATERIA PRIMA

Los sustratos son las materias primas o materiales orgánicos que son degradados en el proceso de digestión anaerobia. Según Yáñez¹⁶ un sustrato ideal debe cumplir con: humedad adecuada, fuentes de carbono, nitrógeno y energía, macro y micronutrientes y factores que mejoren su crecimiento. Las materias primas usadas en la digestión anaerobia abarcan la mayoría de los residuos orgánicos de diferentes orígenes.

1.1.1 Residuos Orgánicos. Los residuos orgánicos son compuestos que tienen la facilidad de biodegradarse rápidamente y generar diferentes productos como resultado, dicha degradación se produce por auto descomposición o por la presencia de agentes externos como microorganismos. Este proyecto está enfocado en el aprovechamiento de los residuos de origen vegetal, los cuales son producto de procesos industriales alimenticios, así como en la evaluación de la codigestión con estiércol bovino dentro del proceso; por lo tanto, se clasificarán los residuos orgánicos según su origen, en animales y vegetales:

1.1.1.1 Origen animal. Son residuos provenientes de animales, pueden ser subproductos o residuos de diferentes procesos o actividades, tales como la producción de cárnicos y actividades ganaderas. En la actualidad se ha incrementado la reutilización de aquellos residuos orgánicos que no representan peligro para la salud humana, con el fin de generar subproductos orgánicos de origen animal por medio del aprovechamiento de los macro y micronutrientes presentes en estos. Entre los usos comunes se encuentran la generación de fertilizantes, compostaje y energías alternativas como lo es el biogás.

¹⁶ YÁNES, Geovanny. Uso de distintos sustratos para el desarrollo de la biomasa bacteriana [En línea]. Tesis de Grado ingeniero en industrias pecuarias. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias Pecuarias. 2016 p. 26-27. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5788>

1.1.1.2 Origen vegetal. Son residuos provenientes de frutas y vegetales como cáscaras, rastros y productos en descomposición; son generados como producto de actividades alimenticias en hogares, plazas de mercado e industrias procesadoras de alimentos. Por su alto contenido orgánico también son usados principalmente en aplicaciones de compostaje, sin embargo, como se muestra en la **Figura 1**, según la Comisión para la Cooperación Ambiental de Montreal es preferible realizar la recuperación de estos residuos por medio de aplicaciones industriales, dentro de las cuales se encuentra la producción de energías alternativas.

Figura 1. Jerarquía de la recuperación de alimentos



Fuente: CCA. Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte [En línea]. Informe Sintético. Comisión para la Cooperación Ambiental. Montreal: 2017. p.6 [Consultado 11, marzo, 2020]. Disponible en: <http://www3.cec.org/islandora/en/item/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf>. ISBN: 978-2-89700-232-9

1.1.2 Frutas. Las frutas son productos vegetales comestibles proveniente de diferentes tipos de plantas, generalmente las frutas poseen un alto contenido de vitaminas y minerales así como de agua, esto implica su descomposición por procesos microbiológicos; por lo general, los residuos de frutas generan una cantidad significativa de residuos que pueden ser aprovechables, según Mosos, Cadavid y Agudelo “en particular, los residuos de frutas y verduras tienen un gran

potencial de aprovechamiento a través de procesos biológicos, por su alta biodegradabilidad”.¹⁷

Los objetos de estudio en el presente trabajo de investigación son los residuos de frutos cítricos: limón, mandarina y naranja. Para el año 2019 hubo un crecimiento en el sector cítrico con una participación del 12% de la producción hortifrutícola de Colombia siendo la segunda línea productiva con mayor producción¹⁸, así mismo, como se muestra en la **Tabla 1**, hubo un crecimiento notorio en la producción de cítricos según su consumo per cápita desde el año 2014 hasta el año 2017, lo cual representa, grandes cantidades de residuos post-consumo que pueden ser transformados en materia prima para la producción de biogás.

Tabla 1. Consumo cítricos en Colombia

CONSUMO CÍTRICOS	2014	2015	2016	2017
Nacional (Ton)	1.111.074	1.124.197	1.249.660	1.290.567
Importado (Ton)	1.346	1.750	2.843	963
Exportaciones (Ton)	17.937	6.262	17.547	35.003
Total Consumo Aparente	1.094.483	1.119.685	1.234.956	1.256.527
Población	47.661.787	48.203.405	48.650.000	48.650.000
Consumo Percapita (Kg.)	23	23	25	26

Fuente: ASOHOFrucOL. Comportamiento del Mercado Nacional e Internacional de Cítricos Frescos. [Presentación en línea]. MINCIT, Colombia. 2018. [Consultado: 13, Agosto, 2020]. Disponible en: http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/CongresoInternacionalCitricola/Comportamiento_Mercado_Nacional_Internacional_c%C3%ADtricos_frescos.pdf

Los cítricos se caracterizan por su alto contenido de vitaminas, fibras y minerales. La mayor concentración de lípidos se encuentra en las semillas y en el flavedo (Capa interna de la fruta), por lo tanto, es donde la mayor parte de ácidos grasos volátiles se concentra, que como se mencionará posteriormente son una de las principales variables durante el proceso de metanogénesis.

1.1.3 Inóculo. La inoculación es el proceso por el cual se transfiere una carga microbiana a un huésped, la adición de un inóculo a un sustrato puede mejorar su capacidad de producción metanogénica, también es importante evaluar la adición de un inóculo debido a que el tiempo para el arranque del reactor será corto si el

¹⁷ MOSOS, Andrés; CADAVID, Luz. y AGUDELO, Ana. Potencial de biogás de residuos de frutas y verduras provenientes de restaurantes de Palmira. En: Acta Agronómica [En línea]. Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2012, vol.61, nro.5, p 97-98. [Consultado: 3 de Marzo de 2020]. Disponible en url: https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/41478/43087. ISSN. 2323-0118

¹⁸ ASOHOFrucOL. BALANCE DEL SECTOR HORTIFRUTÍCOLA EN 2019. [En línea]. MINCIT, Colombia. 2019. [Consultado: 13, Agosto, 2020]. Disponible en: <http://www.asohofrucol.com.co/interna.php?cat=3&scat=45&act=1>

lodo utilizado como inóculo tiene una alta actividad metanogénica y está adaptado a los sustratos a usar¹⁹.

Según Vivanco, Yaya y Molina²⁰ “producto de la digestión anaerobia se genera una mezcla de agua y sólidos que se conoce como lodo. Esta mezcla está compuesta por materia no orgánica, materia orgánica no digerida y biomasa bacteriana.” El lodo es producido como residuo durante el tratamiento anaeróbico del agua residual proveniente del proceso productivo la cual posee una carga orgánica alta, al encontrarse en estado de metanogénesis el lodo esta enzimáticamente activo, lo cual lo hace ideal para aportar la carga microbiana ideal para el proceso de digestión anaerobia, así como disminuir el tiempo de arranque para la producción de biogás; este lodo debe pasar por procesos de tratamiento para su disposición final y por lo general se usa como fertilizante o acondicionador de suelos, lo cual implica un aprovechamiento total de la materia prima empleada.

1.2 DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso metabólico realizado por diferentes microorganismos por efecto de su actividad enzimática, dicho proceso es inhibido por la presencia de oxígeno y sus precursores. Uno de los principales productos de la digestión anaerobia es el gas metano, el cual posee una capacidad energética alta, esta energía puede ser aprovechable para diferentes procesos de combustión.

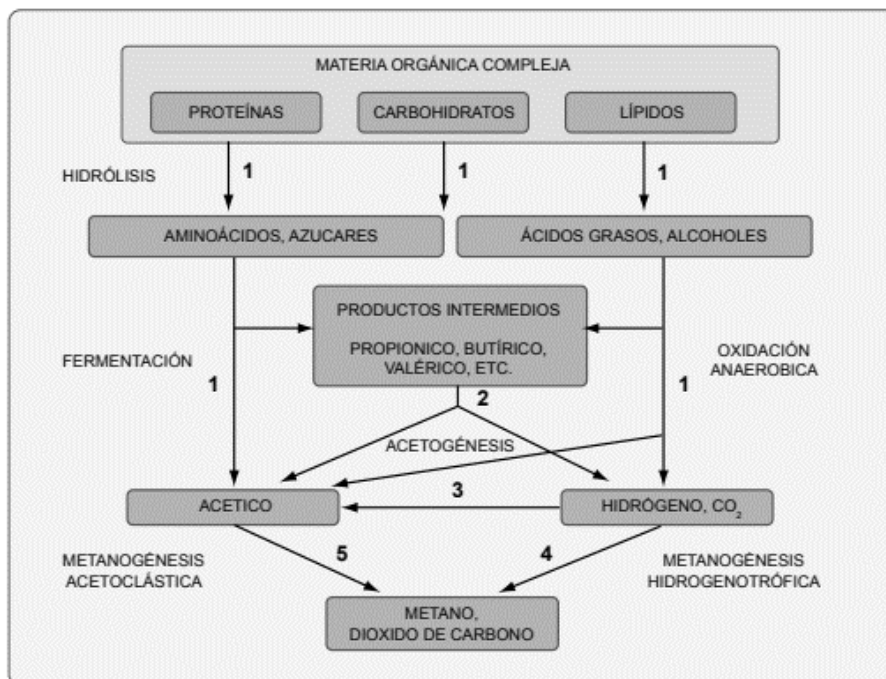
Según fundamentación teórica el proceso de digestión anaerobia se puede dividir en cuatro etapas principales: Hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Estas etapas y las reacciones ocurridas en ellas son explicadas en la **Figura 2** “Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.”²¹

¹⁹ DÍAZ-BAÉZ, María; ESPITIA, Sandra y MOLINA, Francisco. Digestión Anaerobia: una aproximación a la tecnología [En línea]. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia, 2002. p.96. [Consultado: 14 de Marzo de 2020]. Disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/43178/2/9587011961_Parte%201.pdf ISBN: 958-701-196-1

²⁰ VIVANCO, Elba; YAYA, Rosa y MOLINA, F. Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales [En línea]. Perú: Red de Tratamiento y reciclaje de aguas industriales mediante soluciones sostenibles fundamentadas en procesos biológicos. (TRITÓN-316RT0506) Programa Cyted, 2018. p.26. [Consultado: 22 de Junio de 2020]. Disponible en: <http://www.cyted.org/es/biblioteca/manual-tecnico-sobre-tecnologias-biologicas-anaerobias-aplicadas-al-tratamiento-de-aguas> ISBN: 978-84-09-08638-2

²¹ VARNERO. María. Manual del biogás [en línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Chile: 2011. p.20. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf> ISBN: 978-95-306892-0

Figura 2. Reacciones químicas durante la digestión anaerobia



Fuente: VARNERO, María. Manual del biogás [en línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Chile: 2011. p.20. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf> ISBN: 978-95-306892-0

1.2.1 Hidrólisis. Acorde a De Lemos²² la hidrólisis consiste en la hidrólisis del material polimérico en moléculas más pequeñas por acción de las exo-enzimas, estas moléculas simples pueden penetrar a través de las membranas celulares de las bacterias fermentativas. “La hidrólisis de los polímeros generalmente ocurre lentamente en condiciones anaeróbicas, y varios factores pueden afectar el grado y la velocidad a la que se hidroliza el sustrato.”

Según Varnero: “La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato, del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis.”²³

²² DE LEMOS, Carlos. DE LEMOS, Carlos. Anaerobic Reactors. Department of Sanitary and Environmental Engineering, Federal University of Minas Gerais. Brasil: IWA Publishing, 2007. p.7 vol.4. [Consultado: 27 de Marzo de 2020]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U9YI64/anaerobic-reactors-volume/microbiology-anaerobic> ISBN: 978-1-68015-587-7

²³ VARNERO, Op. cit., p. 19.

1.2.2 Acidogénesis. Durante esta etapa las bacterias fermentativas transforman las moléculas simples en compuestos que son transformados en metano durante la metanogénesis como ácido acético y compuestos orgánicos más reducidos. De Lemos afirma que “la acidogénesis es producida por grupos grandes y diversos de bacterias fermentativas. Las especies habituales pertenecen al grupo de los clostridios, que comprende especies anaerobias que forman esporas, capaces de sobrevivir en ambientes muy adversos, y la familia Bacteroidaceaea, organismos comúnmente encontrados en el tracto digestivo, que participan en la degradación de azúcares y aminoácidos.”²⁴

1.2.3 Acetogénesis. Los ácidos grasos y otras moléculas orgánicas se metabolizan en acetato, dióxido de carbono e hidrógeno por microorganismos acetogénicos durante la acetogénesis.²⁵ La inhibición de la metanogénesis puede ocurrir si las moléculas de hidrógeno no son metabolizadas posteriormente.

De acuerdo con el manual de biogás de la FAO escrito por Varnero²⁶ “a esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.”

1.2.4 Metanogénesis. Según De Lemos²⁷ “La fase final en el proceso general de degradación anaeróbica de compuestos orgánicos en metano y dióxido de carbono es realizada por las arqueas metanogénicas. Usan solo un número limitado de sustratos, que comprenden ácido acético, hidrógeno/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas y monóxido de carbono”; en cuanto a los microorganismos Luque; Ki Lin; Wilson y Clark²⁸ especifican que: “en vista de su afinidad por el sustrato y el alcance de la producción de metano, los microorganismos metanogénicos se dividen en dos grupos principales, uno que forma metano a partir de ácido acético o metanol, y el otro que produce metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono”. El conjunto de las reacciones más importantes que se desarrollan el proceso de digestión anaerobia y su clasificación en cada una de las etapas anteriormente mencionadas se pueden observar en la **Tabla 2.**

²⁴ DE LEMOS, Op. cit., p. 7.

²⁵ LUQUE, Rafael; KI LIN, Carol; WILSON, Karen y CLARK, James. Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies. [En línea]. Segunda Edición. Reino Unido y Estados Unidos. Woodhead Publishing, 2016 p.260. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04240-2> ISBN:978-0-08-100456-2

²⁶ VARNERO, Op. cit., p. 22.

²⁷ DE LEMOS, Op. cit., p. 8

²⁸ LUQUE; KI LIN; WILSON y CLARK., Op. cit., p. 261

Tabla 2. Reacciones involucradas en la digestión anaerobia

Tipo de Reacción	Ecuación	$\Delta G^{\circ 1}$ (KJ/rx)	$\Delta G^{\circ 2}$ (KJ/rx)
Fermentación de glucosa a acetato	$\text{Glucosa} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}^+ + 4\text{H}_2$	-207	-319
Fermentación de la glucosa a butirato	$\text{Glucosa} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2 + 2\text{HCO}_3^- + 3\text{H}^+ + \text{H}_2$	-135	-284
Fermentación del butirato a acetato e H_2	$\text{Butirato} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$	+48.2	-17.6
Fermentación del propionato a acetato	$\text{Propionato} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$	+76.2	-5.5
Acetogénesis a partir del H_2 y CO_2	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O}$	-105	-7.1
Metanogénesis a partir del CO_2 y H_2	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$	-136	-3.2
Metanogénesis a partir del acetato	$\text{Acetato} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$	-31	-24.7

¹Condiciones estándar: solutos 1 molar, gases 1 atmósfera.
²Condiciones típicas en un reactor anaerobio: AGV = 1mM, $\text{HCO}_3^- = 20\text{mM}$.
 Glucosa=10mM, $\text{CH}_4 = 0.6\text{mM}$, $\text{H}_2 = 10^{-4} \text{mM}$.

Fuente: DÍAZ-BAÉZ, María; ESPITIA, Sandra y MOLINA, Francisco. Digestión Anaerobia: una aproximación a la tecnología [En línea]. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia, 2002. p.45. [Consultado: 14 de Marzo de 2020]. Disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/43178/2/9587011961_Parte%201.pdf ISBN: 958-701-196-1

1.3 FACTORES QUE AFECTAN LA DIGESTIÓN

Con el fin de evaluar la producción de biogás a partir de determinado sustrato, se deben tener en cuenta diferentes características de la materia prima, así como factores, variables y parámetros que influyen durante el proceso de digestión y en la calidad del producto obtenido.

1.3.1 Humedad y sólidos totales. La humedad se define como la cantidad de agua presente en la biomasa, expresada como un porcentaje del peso. El contenido de agua contribuye a la disminución de los sólidos totales presentes en la mezcla, los cuales afectan la movilidad de las bacterias dentro del sustrato, los sólidos totales representan la porción sólida presente en una mezcla. Según el manual de

Biogás de la FAO²⁹ se ha comprobado experimentalmente que, para digestores anaerobios discontinuos, los sustratos adecuados son aquellos que contienen entre un 40 a 60% de sólidos totales. Para calcular el volumen de agua que se debe mezclar con la materia prima se aplica la siguiente fórmula:

Ecuación 1. Contenido de solidos totales

$$\text{Agua a agregar} = 1 \text{ kg de fruta} \left(\frac{\% \text{ ST de fruta fresca}}{\% \text{ ST (carga diluída) deseado}} - 1 \right)$$

Fuente: VARNERO. María. Manual del biogás [en línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Chile: 2011. p.20. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf> ISBN: 978-95-306892-0

Siendo %ST el porcentaje de sólidos totales de la fruta fresca y de la carga diluida.

Los sólidos volátiles representan los sólidos que son liberados de una mezcla cuando se calienta a altas temperaturas y proporcionan una idea de los ácidos grasos volátiles presentes en la mezcla, los cuales se convierte a metano.

1.3.2 pH. El pH mide la acidez presente dentro de la mezcla en el proceso de digestión anaerobia; el pH óptimo debe tender a un valor neutro, por lo cual para las mezclas compuestas únicamente con sustratos ácidos como lo son los residuos de frutas cítricas se debe regular el pH. Según la FAO³⁰ “El pH óptimo es entre 5.5 y 6.5 en etapa acidogénicos y entre 7.8 y 8.2 para metanogénicos. El pH óptimo para mezclas con cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el ideal”.

El valor del pH en el digestor afecta la composición del biogás, una disminución en el pH a valores inferiores a 6, implica que el biogás generado es pobre en metano disminuyendo sus cualidades energéticas. El nivel de pH deseado para la operación del digestor se puede conseguir ajustando el pH de las materias primas que entran al digestor o controlando el pH dentro del digestor. Los desequilibrios en el pH se crean especialmente durante la bioconversión de proteínas y lípidos, es decir, por la acumulación de amoníaco libre y ácidos grasos volátiles.

1.3.3 Alcalinidad. La alcalinidad está directamente relacionada con el pH, su medición se realiza durante el proceso de digestión anaerobia. La alcalinidad del sistema se puede ver afectada por las diferentes reacciones y cambios que ocurren dentro del reactor durante la digestión anaerobia, por lo cual, se hace necesario aumentarla haciendo uso de soluciones que actúen como buffer o tampón, es decir, amortiguando o regulando el pH dentro del sistema, esta adición se puede emplear

²⁹ VARNERO, Op. cit., p. 37.

³⁰ *Ibíd.*, p. 43.

directamente en la materia prima justo antes de iniciar el proceso de digestión, o durante el proceso, tras las mediciones de pH y en las cantidades necesarias para su regulación, sin embargo, esta última modalidad es de mayor riesgo al momento de emplear reactores estrictamente anaerobios.

1.3.4 Ácidos grasos volátiles. Estos ácidos por lo general evidencian la actividad enzimática microbiana, ya que son producidos por acción de las enzimas intra y extracelulares de las bacterias a su vez, son productos intermedios que son transformados por las bacterias metanogénicas en metano durante la digestión anaerobia. En un sistema anaerobio óptimo, la concentración de los AGV en la mezcla se encuentra usualmente en el rango de 50-250 mg HAc/l.³¹ Se miden por método experimental por medio de la titulación con ácido clorhídrico e hidróxido de sodio o por cromatografía líquida (HPLC).

Las biomásas ricas en nutrientes (péptidos y aminoácidos) pueden acidificarse fácilmente debido a los ácidos grasos volátiles producidos por los microorganismos fermentativos.³² La acumulación de ácidos grasos volátiles resulta en una disminución del pH, generando una inhibición en el sistema y por lo tanto afectando la producción de biogás. Entre los productos intermedios que dan origen a los ácidos grasos se encuentran: carbohidratos, celulosa, hemicelulosa, xilosas, pectinas entre otros, de las cuales la mayoría de las frutas están compuestas.

1.3.5 Temperatura. Los procesos anaeróbicos son fuertemente dependientes de la temperatura porque influyen en el crecimiento microbiano, las actividades enzimáticas, las características del sustrato y, por consiguiente, en el rendimiento de metano. Aunque la digestión anaerobia convencional se realiza a temperaturas mesofílicas de 35-37°C, la digestión anaerobia termofílica tiene ventaja en cuanto a la tasa de crecimiento específico, metabolismo más rápido, una mayor capacidad de carga y, por consiguiente, un mayor rendimiento de metano. Según Varnero³³ “A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás”, por lo tanto, la temperatura también afecta el tiempo de retención del sustrato dentro del reactor tal y como se puede observar en la **Tabla 3.**

³¹ *Ibíd.*, p. 47.

³² PARRA, Ricardo. Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. En: Producción + Limpia [En línea]. Lugar de publicación: Boyacá, Colombia. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia., 2015, vol.(10), nro.(2), p. 142-159. [Consultado: 27 de Marzo de 2020]. DOI sino tiene DOI coloque Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014&lng=en&nrm=iso ISSN: 1909-0455

³³ VARNERO Op. cit., p. 39.

Tabla 3. Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación anaeróbica

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tipo de fermentación
Psycrophilica	4-10°C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20°C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	74-80°C	10-15 días

Fuente: VARNERO. María. Manual del biogás [en línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Chile: 2011. p.39. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf> ISBN: 978-95-306892-0

1.3.6 Velocidad de carga orgánica. En los reactores continuos el tiempo de retención, junto con la velocidad de carga orgánica determinada por el tipo de sustrato, son los principales parámetros de diseño, definiendo el volumen del digestor, así como el tiempo de permanencia de la mezcla dentro del reactor. La velocidad de carga orgánica es la cantidad de mezcla que ingresa a un reactor generalmente por unidad de tiempo.

1.3.7 Contenido de carbono y nitrógeno. Los microorganismos anaerobios pueden metabolizar diferentes compuestos orgánicos (hidratos de carbono, proteínas, lípidos, etc.). El contenido de metano de la mezcla de biogás depende de la biomasa, en particular del estado oxidativo de carbono encontrado en las materias primas.

Según Varnero³⁴ las bacterias metanogénicas consumen treinta veces más carbono que nitrógeno, se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1 es el rango óptimo para una buena digestión anaerobia, un exceso de carbono puede hacer que la producción de biogás sea lenta, mientras que un exceso de amoníaco inhibirá el crecimiento de bacterias metanogénicas. Lamentablemente, en la mayoría de los casos, la relación C/N de la materia prima está fuera del rango.” En tal situación, a menudo se aplica la codigestión de las materias primas seleccionadas con el fin de ajustar la relación C/N y estabilizar la producción de biogás³⁵. El contenido carbono/nitrógeno teórico de un sustrato en específico puede ser determinado mediante la siguiente ecuación:

³⁴ *Ibíd.*, p. 35.

³⁵ Luque; Ki Lin; Wilson y Clark., *Op. cit.*, p. 261

Ecuación 2. Determinación Relación Carbono-Nitrógeno

$$K = \frac{C1 \cdot Q1 + C2 \cdot Q2 + \dots + Cn \cdot Qn}{N1 \cdot Q1 + N2 \cdot Q2 + \dots + Nn \cdot Qn}$$

K = C/N de la mezcla de materias primas.

C = % de carbono orgánico contenido en cada materia prima.

N = % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima.

Q = Peso fresco de cada materia, expresado en kilos o toneladas.

Fuente: VARNERO. María. Manual del biogás [en línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Chile: 2011. p.395. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf> ISBN: 978-95-306892-0

1.3.8 Macronutrientes y micronutrientes. Los macro y micronutrientes junto con algunas vitaminas son necesarios para la función óptima de los microorganismos anaerobios; la adición de macro y micronutrientes es de vital importancia para soportar la carencia de los mismos en algunos tipos de sustratos sólidos y en donde se requiere de un medio mineral sintético que brinde estos componentes a la mezcla que ingresa al proceso digestivo.

De acuerdo con Angelidaki y Sanders³⁶ el medio mineral consiste en la mezcla de diversos minerales y no debe contener ninguna cantidad significativa de carbono orgánico, estos minerales cumplen con la función de ser una fuente importante de macro y micronutrientes junto a algunos factores de crecimiento (como las vitaminas). Como se mencionó anteriormente, cuando existe una falta de componentes importantes que podrían estar limitando el crecimiento microbiano en el medio natural, se utilizan medios sintéticos que aportan los componentes faltantes. Los minerales de mayor relevancia y su importancia en el proceso de digestión anaerobia se encuentran en la **Tabla 4**, adicionalmente se anexan los compuestos químicos que pueden aportar cada uno de los minerales al medio sintético.

1.3.9 Demanda Química de oxígeno. Según el IDEAM³⁷ “la Demanda Química de Oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo.” La demanda química de oxígeno es un indicador de la cuantificación de la biodegradación de la materia orgánica mediante la variación de la demanda química de oxígeno (DQO) y el volumen de biogás generado como productos de la digestión, una disminución en la conversión de DQO representa algún tipo de inhibición dentro del reactor.

³⁶ ANGELIDAKI, Op. Cit. p. 122

³⁷ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría. TP0086 V5 [en línea]. Bogotá D.C: IDEAM. 2007. p.2. [Consultado: día 28 de Marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno.pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>

Tabla 4. Principales compuestos requeridos en la digestión anaerobia

Compuesto	Función en la célula	Forma química suministrada en el medio sintético
Nitrógeno (N)	Compuesto más abundante después del carbono. Elemento principal en los ácidos nucleicos y aminoácidos	NH ₄ Cl, (NH ₄) ₂ SO ₄ , N ₂ , KNO ₃
Fosforo (P)	Para ácidos nucleicos y fosfolípidos	KH ₂ PO ₄ , Na ₂ HPO ₄
Azufre (S)	En los aminoácidos cisteína y metionina, vitamina tales como tiamina, biotina, ácidos lipídicos y coenzimas A	Na ₂ SO ₄ , KH ₂ SO ₄ , Na ₂ S ₂ O ₃ , Na ₂ S, cisteína, etc.
Potasio (K)	Utilizado por varias enzimas diferentes	KCl, KH ₂ PO ₄
Magnesio (Mg)	Estabiliza ribosomas, membranas celulares y ácidos nucleicos	MgCl ₂ , MgSO ₄
Sodio (Na)	Necesaria para varias enzimas	NaCl
Calcio (Ca)	Ayuda a estabilizar la pared celular bacteriana y es importante para estabilizar endosporas	CaCl ₂
Hierro (Fe)	Presente en los citocromos	FeCl ₃ , FeSO ₄ , complejos con EDTA, etc.
Micronutrientes	Usualmente necesarios para enzimas específicas	Cr, Co, Cu, Mn, Mo, Ni, Se, V, Zn
Factores de crecimiento	Requeridos en pequeñas cantidades	Vitaminas, aminoácidos (esenciales), purinas, pirimidinas

Fuente: TRADUCIDO de ANGELIDAKI, Irini; SANDERS, Wendy. Assessment of the anaerobic biodegradability of macro pollutants. En: Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 3 [En línea] Netherlands, 2004, p.122. [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/225249844_Assessment_of_the_anaerobic_biodegradability_of_macropollutants

1.3.10 Inhibidores del proceso. Es importante evitar la presencia de sustancias que no corresponden a la digestión anaerobia y que pueden resultar tóxicas para los microorganismos metanogénicos inhibiendo sus procesos metabólicos. Estas sustancias pueden ingresar al digestor por medio de las materias primas (amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados, cianuro y fenoles), así como pueden

ser subproductos (amoníaco y ácidos grasos de cadena larga)³⁸. En la **Tabla 5** se muestran las concentraciones inhibitoras en digestores anaerobios para diferentes sustancias:

Tabla 5 . Concentración de sustancias inhibitoras

Inhibidor	Concentración inhibitora
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: ARBOLEDA, Yeison y GONZÁLEZ, Luis. Fundamentos para el diseño de biodigestores [en línea]. Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas. Universidad nacional de Colombia sede Palmira, facultad de ingeniería y administración, Palmira.: 2012. p. 18. [Consultado 28 de marzo de 2020] Disponible en <http://bdigital.unal.edu.co/7967/>

1.4 TIPOS DE REACTORES

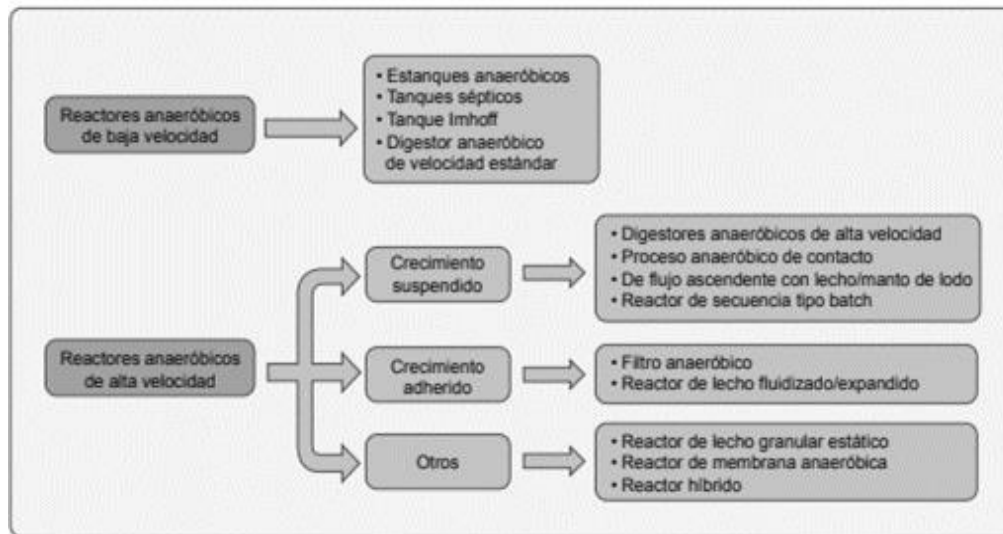
Como su nombre lo indica, dentro de los reactores ocurren las diferentes reacciones que dan lugar a la digestión anaerobia, para que esto ocurra, los reactores deben propiciar las condiciones adecuadas como temperatura, presión, volumen y capacidad entre otras, así mismo, los reactores deben permitir la separación de las fases, es decir del gas y del lodo empleado como materia prima; la **Figura 3** muestra los diferentes tipos de reactores según el Manual de Biogás de la FAO.

A continuación, se explican los tipos de reactores comúnmente empleados para la digestión anaerobia.

1.4.1 Reactor tipo Batch. Estos reactores se caracterizan por ser de tipo discontinuo, se maneja por lotes y por un tiempo de retención fijo. Este reactor es ideal para procesos en los cuales se dese obtener bajas cantidades de biogás, sin embargo, representa mayores costos variables debido a que se debe realizar la limpieza después de producir cada lote, lo cual los hace poco recomendados para tratamiento de grandes cantidades de residuos orgánicos. Este tipo de reactor también es empleado para reactores en secuencia, por etapas de digestión.

³⁸ VARNERO, Op. cit., 19.

Figura 3. Clasificación de los reactores anaeróbicos



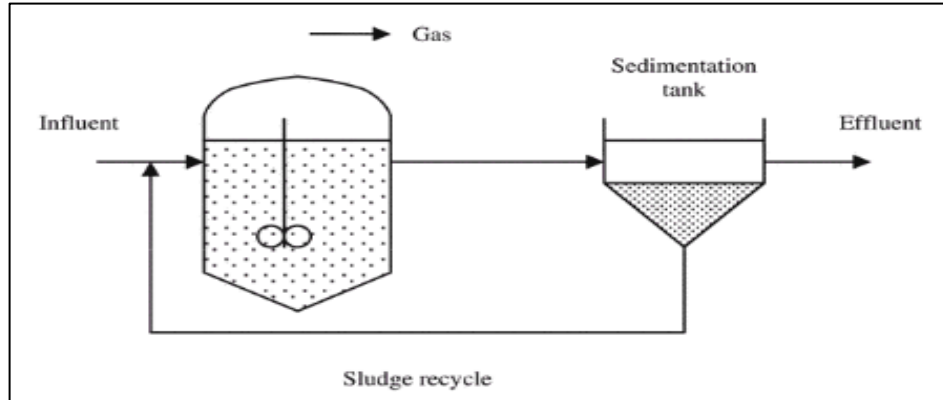
Fuente: VARNERO. María. Manual del biogás [en línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Chile: 2011. p.85. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf> ISBN: 978-95-306892-0

1.4.2 Reactores CSTR. Son reactores que se caracterizan por ser tanques agitados continuamente, la carga orgánica se mantiene dentro del reactor durante un tiempo de retención establecido y sale digerida una vez es finalizado el proceso, a su vez ingresa una carga orgánica nueva. Este tipo de reactores son comúnmente empleados para depurar lodos residuales y para su tratamiento.

1.4.3 Reactores de contacto. Según Stephenson y Stuetz³⁹ “la biomasa anaerobia activa se separa de la biomasa digerida por sedimentación de lodos u otros procesos de separación (como filtración por membrana o centrifugación) y se devuelve al reactor para mantener un alto contenido de biomasa.” Para este reactor es indispensable un excelente sistema de sedimentación para poder separar adecuadamente las fases y se recomienda emplear sistemas de desgasificación para evitar la presencia de fracciones de gas en el lodo que se encuentra activo. La **Ilustración 1.** es una representación gráfica del proceso de sedimentación y recirculación de lodo en un reactor de contacto.

³⁹ STEPHENSON, Tom y STUETZ, Richard. Principles of Water and Wastewater Treatment Processes - 6. Biological Processes. London: IWA Publishing, 2009. p.138 [Consultado: 24 de Marzo de 2020]. Disponible en: [https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00UA1ZH1/principles-water-wastewater/biological-processes volume/microbiology-anaerobic](https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00UA1ZH1/principles-water-wastewater/biological-processes%20volume/microbiology-anaerobic) ISBN: 978-1-68015-580-8

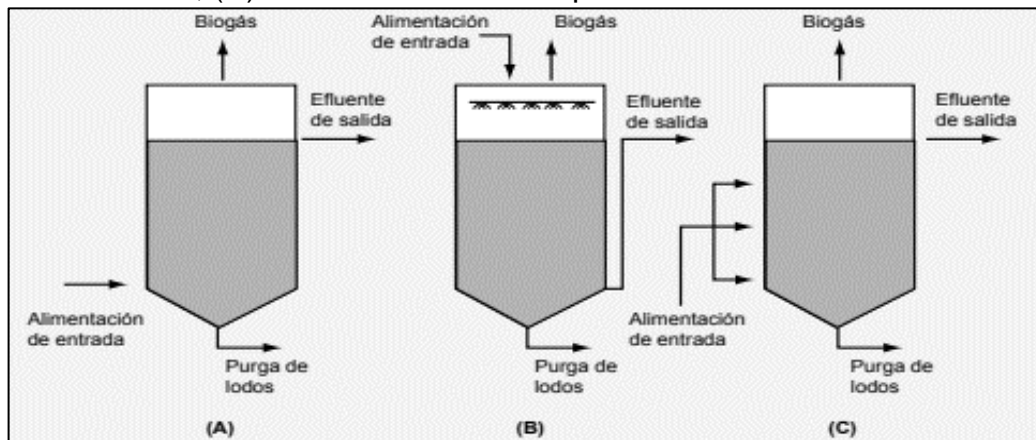
Ilustración 1. Funcionamiento de reactor anaerobico de contacto



Fuente: STEPHENSON, Tom y STUETZ, Richard. Principles of Water and Wastewater Treatment Processes - 6. Biological Processes. London: IWA Publishing, 2009. p.139 [Consultado: 24 de Marzo de 2020]. Disponible en: [https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00UA1ZH1/principles-water-wastewater/biological-processes volume/microbiology-anaerobic](https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00UA1ZH1/principles-water-wastewater/biological-processes%20volume/microbiology-anaerobic) ISBN: 978-1-68015-580-8

1.4.4 Filtros anaeróbicos. Estos se caracterizan por tener un medio estático en el cual se retiene la biomasa activa y los filtros están completamente en contacto con el lodo de como que se mantenga la ausencia de oxígeno, como se observa en la **Ilustración 2.** se operan de forma ascendente, descendente y con alimentación múltiple, con una alta variedad de medios como filtros. Son usados generalmente para desnitrificar el lodo.⁴⁰

Ilustración 2. Filtros anaeróbicos: (A) De flujo ascendente; (B) De flujo descendente; (C) De alimentación múltiple.

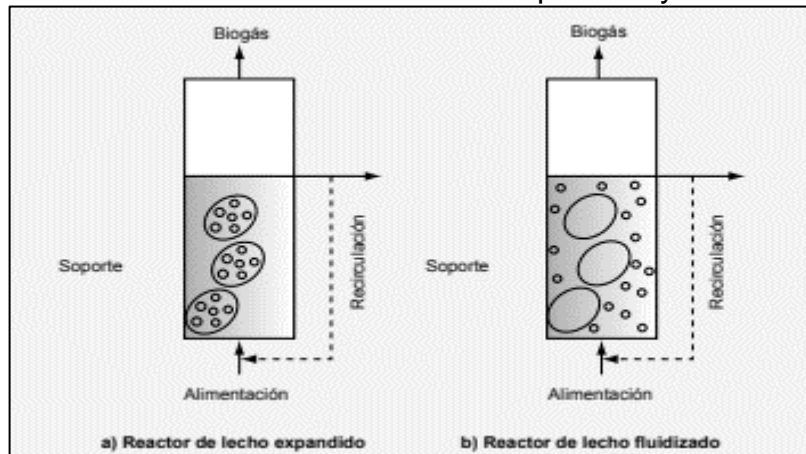


Fuente: VARNERO. María. Manual del biogás [en línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Chile: 2011. p.87. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf> ISBN: 978-95-306892-0

⁴⁰ *Ibíd.*, p. 139

1.4.5 Reactor de lecho fluidizado (AFBR) y de lecho expandido (AEBR). Este reactor es de película fija y consiste en medios líquidos que se recubren con biomasa en suspensión. Según Varnero⁴¹: “corresponde a una estructura cilíndrica, empaquetada hasta un 10% del volumen del reactor con un soporte inerte de pequeño tamaño lo que permite la acumulación de elevadas concentraciones de biomasa que forman películas alrededor de dichas partículas.” Como se observa en la **Ilustración 3** el reactor de lecho fluidizado requiere un flujo ascendente permanente mientras que en el de lecho expandido el flujo es de forma ascendente hasta que es expandido.

Ilustración 3. Reactores de lecho expandido y fluidizado



Fuente: VARNERO. María. Manual del biogás [en línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Chile: 2011. p.87. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

1.4.6 Reactores UASB. Como se puede observar en la **Ilustración 4** este tipo de reactor consiste en un tanque biológico de flujo ascendente combinado con una etapa de asentamiento, agregando la biomasa a flóculos granulares densos. Requieren de una buena inoculación y cuentan con una difícil operación.

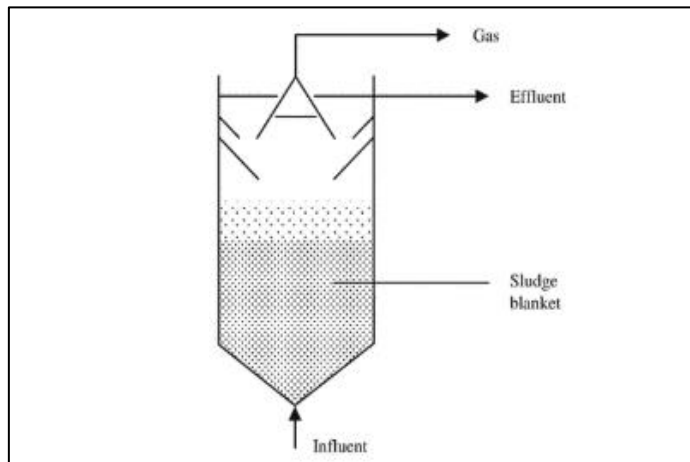
Esta clase de reactores UASB (Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente y Manto de Lodos) fueron desarrollados en los años 70 y en la actualidad son utilizados mundialmente para el tratamiento de efluentes principalmente en países de clima tropical⁴².

⁴¹ VARNERO, Op. cit., p. 90.

⁴² LORENZO, Yaniris. y OBAYA, Ma.Cristina. La digestión anaerobia y los reactores UASB Generalidades. En: ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar [En línea]. Ciudad de la Habana, Cuba: 2006. vol. XL, p. 14. [Consultado 11 de Marzo 2020] Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223121549002.pdf>. ISSN: 0138-6204

De acuerdo con Lorenzo y Obaya: “La principal característica de un reactor UASB, además del flujo ascendente, es la formación de un manto de lodo floculento o granular con buena capacidad de sedimentación, en donde se realiza la actividad biológica. La granulación es un proceso que ha sido citado en pocas oportunidades durante el tratamiento de líquidos cloacales”⁴³.

Ilustración 4. Funcionamiento reactor UASB



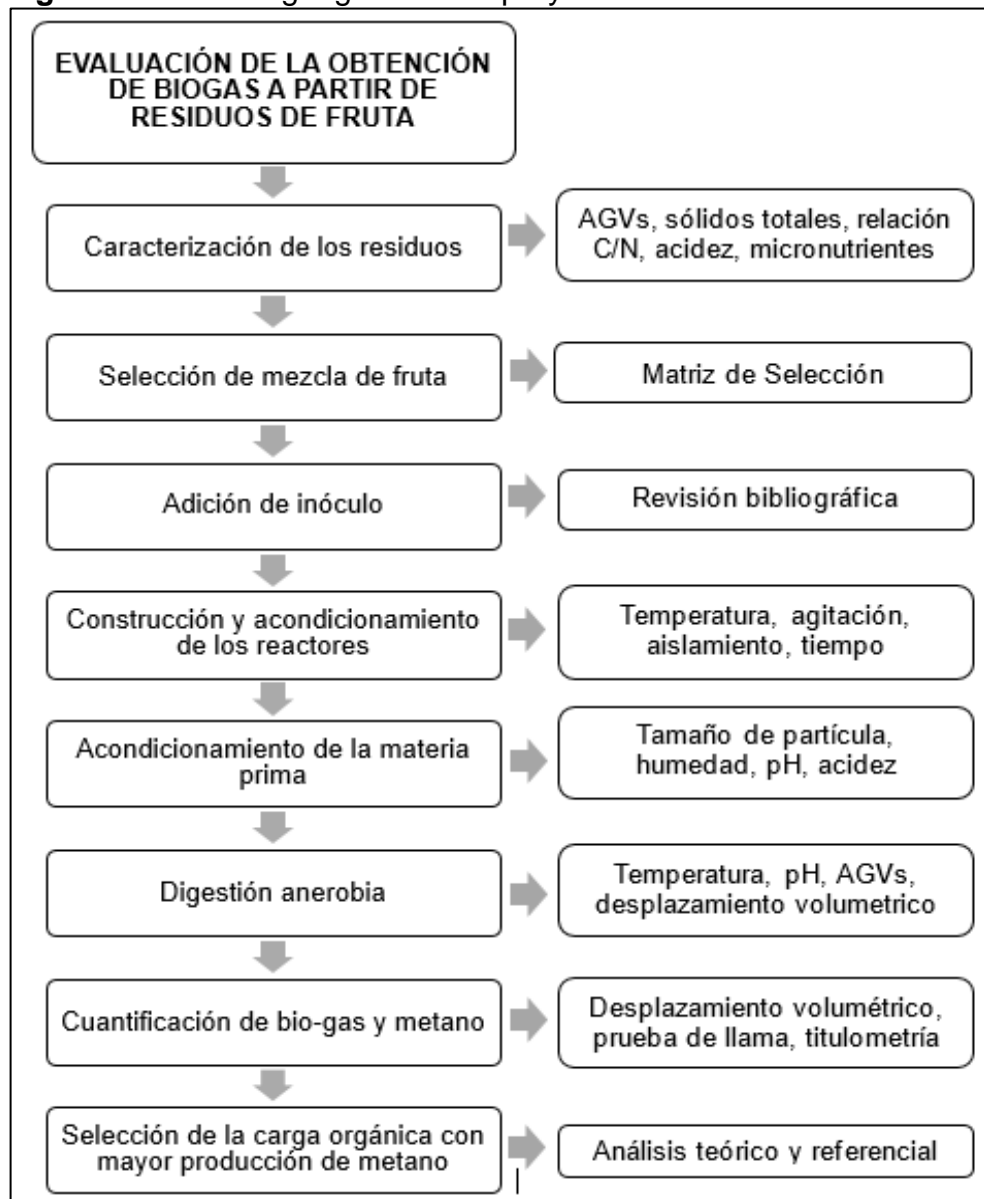
Fuente: STEPHENSON, Tom y STUETZ, Richard. Principles of Water and Wastewater Treatment Processes - 6. Biological Processes. London: IWA Publishing, 2009. p.139 [Consultado: 24 de Marzo de 2020]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00UA1ZH1/principles-water-wastewater/biological-processes-volume/microbiology-anaerobic> ISBN: 978-1-68015-

⁴³ Ibid p. 14.

2. METODOLOGÍA

En la **Figura 4** se expresa la metodología empleada para cumplir con cada uno de los objetivos planteados, abarcando la selección de la mezcla de residuos cítricos que será utilizado como sustrato, el acondicionamiento de los reactores y el sustrato, las corridas experimentales (proceso digestivo) y la selección teórica del contenido de metano; así mismo, se especifican los métodos implementados para el seguimiento de las variables propuestas en cada actividad, cada uno de estos pasos serán detallados a continuación.

Figura 4. Metodología general del proyecto



Fuente: elaboración propia

2.1 SELECCIÓN DE LA MEZCLA DE RESIDUOS

Con el fin de seleccionar la mezcla de residuos que será utilizada como sustrato durante la digestión, se realizó una revisión de las frutas con mayor demanda productiva en los últimos meses de producción, así como aquellas con mayor residuo generado en peso, construyendo así el punto de partida y el foco del proyecto a realizar; posteriormente se recolectó la información requerida para la elaboración de una matriz de selección.

2.1.1 Matriz de selección. Para seleccionar la mezcla de frutas (sustrato) se empleó una matriz de selección de pesos ponderados totales, que es un método para evaluar proyectos, donde se evalúan diferentes opciones, a partir de ciertos parámetros, a los cuales se le asigna una calificación acorde a su importancia establecida por los investigadores.

Para el presente proyecto se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Disponibilidad de recurso
- Rendimiento de la materia prima (% Residuos vs %Pulpa de la fruta)
- Caracterización fisicoquímica del residuo.
- Revisión bibliográfica de los parámetros teóricos
- Pretratamiento necesario para cada residuo.

Teniendo en cuenta los criterios mencionados se establecieron valores entre 1 y 4, dónde 1 (uno) implica la mínima calificación correspondiendo al residuo que no cumple con el parámetro y 4 (cuatro) es la máxima calificación y corresponde al residuo que cumple satisfactoriamente con el parámetro. Para el total se ponderó toda la información y se determinaron valores totales para cada sustrato, las proporciones se determinaron a partir del cociente entre el valor final para cada fruta y la sumatoria de los valores obtenidos.

2.1.1.1 Disponibilidad del recurso y rendimiento del residuo. Estos parámetros fueron analizados a partir de la información entregada por la empresa. En cuanto a la disponibilidad se analizaron los periodos de procesamiento de las frutas seleccionadas en el transcurso del último año, así como su demanda en el proceso principal; el porcentaje de los residuos a obtener se calculó mediante la resta entre la cantidad de pulpa y “limadura” obtenida y el peso total de la fruta. La ecuación usada para el cálculo del rendimiento de la materia prima se expresa a continuación:

Ecuación 3. Calculo de rendimiento

$$\%Residuos = \frac{kg\ de\ fruta - kg\ de\ pulpa - kg\ de\ limadura}{kg\ de\ fruta} * 100$$

Fuente: elaboración propia

2.1.1.2 Pretratamientos que se le deben realizar al residuo. El pretratamiento se evaluó mediante la observación de los residuos muestreados, los factores que se tuvieron en cuenta fueron: la presencia de semillas que requieren una separación previa y la presencia de la cáscara externa, lo cual implica un mayor tiempo de trituración.

2.1.1.3 Análisis fisicoquímicos. Los parámetros fisicoquímicos seleccionados para evaluar el sustrato (residuo de fruta) fueron ácidos grasos volátiles, alcalinidad y sólidos totales de las 3 clases de residuos (limón, naranja, mandarina) evaluados individualmente. Con el fin de evaluar simultáneamente la humedad a emplear se realizó un pretratamiento que consistió en triturar las cáscaras añadiendo agua en diferentes proporciones para obtener mezclas con texturas similares a un lodo. Estas proporciones fueron 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 relación sustrato/agua respectivamente.

Tanto para la alcalinidad como para los ácidos grasos volátiles se empleó el método de titulación con ácido clorhídrico 0.1 N e hidróxido de sodio 0.1 N, en base al segundo procedimiento del **ANEXO A. Protocolo para la determinación de ácidos grasos volátiles y alcalinidad.**

En cuanto a los sólidos totales se realizó mediante método gravimétrico pesando las muestras antes y después del proceso de secado a 105°C durante 2 horas, tal y como se consigna en el **ANEXO B. Protocolo para la determinación de sólidos totales.**

Se realizaron estos análisis fisicoquímicos mediante diluciones 1:10 de las mezclas para cada residuo en las 4 proporciones sustrato/agua anteriormente mencionadas. Dentro de estos análisis fisicoquímicos se analizaron en total 12 análisis fisicoquímicos generales (sólidos totales, ácidos grasos volátiles, alcalinidad), un (1) análisis por cada mezcla evaluada; no se consideraron realizar réplicas de las muestras por temas de disponibilidad del laboratorio y costos de los reactivos en el laboratorio, lo cual repercutió en los resultados obtenidos experimentalmente y que se pueden observar en las **Gráficas 1, 2 y 3** del inciso **3.1.1.4** del presente trabajo. Sin embargo, los resultados de los análisis fisicoquímicos fueron tenidos en cuenta en la calificación de la matriz de selección para la selección de la mezcla de residuos que será utilizada como sustrato en el proceso digestivo.

2.1.1.4 Revisión bibliográfica de los parámetros teóricos. La revisión bibliográfica se segmentó en dos partes. La primera parte está constituida por la relación carbono-nitrógeno, material volátil, humedad y sólidos totales teóricos y la segunda parte conformada por los micronutrientes presentes en cada una de las frutas seleccionadas. La información correspondiente a los micronutrientes fue extraída de la tabla de composición de alimentos del Instituto Colombiano de Bienestar familiar, la cual recopila 773 datos de alimentos y expresa el contenido de

ácidos grasos y aminoácidos presentes en las diferentes frutas⁴⁴; en cuanto a la información correspondiente a la relación carbono-nitrógeno se tomó el artículo “Valorización de residuos de frutas para combustión y pirolisis” realizado por Rojas y Florez⁴⁵ en el cual se caracterizan diferentes residuos de frutas para usos en energías alternativas. Para realizar la calificación se compararon con los parámetros ideales para la digestión anaerobia expresados en la fundamentación teórica del presente trabajo con los encontrados para cada fruta.

2.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Con el fin de determinar el número de tratamientos a realizar durante la fase experimental se plantearon dos etapas (ETAPA 1 Y ETAPA 2) y para cada una de estas se establecieron los siguientes parámetros:

2.2.1 Etapa 1. Esta etapa abarca el inicio de la fase experimental y tuvo una duración de 30 días

2.2.1.1 Variables. La variable independiente a modificar es el tipo de sustrato que se utilizará dentro del proceso y la adición de distintos componentes al mismo (residuos cítricos, estiércol animal) mientras que las variables dependientes de respuesta son la concentración de biogás y metano producido. Los 2 tipos de sustratos evaluados (variables independientes) se pueden observar a continuación:

- Sustrato compuesto únicamente por residuos cítricos
- Sustrato compuesto por residuos cítricos-estiércol bovino (sustrato-cosustrato)

2.2.1.2 Niveles de la variable independiente a modificar. A partir de la revisión bibliográfica se determinaron tres niveles en donde se variará la cantidad de agua empleada para las mezclas finales dentro del proceso digestivo (compuestas por cada tipo de sustrato y agua). Para cada variable se obtienen 3 mezclas finales en base a las proporciones sustrato/agua 1:2, 1:3 y 1:4, tal y como se puede ver en la **Tabla 6**.

⁴⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE BIENESTAR FAMILIAR. Tabla composición Alimentos Colombianos [En línea]. Colombia: ICBF, 2018 p. 56 [Consultado: 5 de Marzo de 2020]. Disponible en: https://www.icbf.gov.co/sites/default/files/tcac_web.pdf ISBN 978-958-623-199-2

⁴⁵ ROJAS, Andrés y FLÓREZ, Cilia. VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE FRUTAS PARACOMBUSTIÓN Y PIRÓLISIS. En: Revista Politécnica. [En línea] Bogotá, Colombia: Politécnico Grancolombiano, 2019, vol. 15, nro.28, p 42-53. [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1395/1164> ISSN 2256-5353

Tabla 6. Mezclas Diseño de Experimentos Etapa 1

Mezclas Proceso Digestivo Etapa 1			
Tipo de Sustrato	Sustrato: agua 1:2 (p/p)	Sustrato: agua 1:3 (p/p)	Sustrato: agua 1:4 (p/p)
Residuos Cítricos	1 parte Residuos Cítricos 2 partes Agua	1 parte Residuos Cítricos 3 partes Agua	1 parte Residuos Cítricos 4 partes Agua
Residuos Cítricos - Estiércol	1 parte Cítricos- Estiércol 2 partes Agua	1 parte Cítricos- Estiércol 3 partes Agua	1 parte Cítricos- Estiércol 4 partes Agua

Fuente: elaboración propia

2.2.1.3 Número de tratamientos. Para determinar el número de tratamientos se empleó un diseño de experimentos de tipo factorial, que como se muestra en la **Ecuación 4**, implica la productoria del número de variables, niveles y el número de experimentos. Se estimó realizar dos experimentos (prueba original y réplica) con el fin de determinar el porcentaje de error entre los experimentos, así como generar variables de respuesta más precisas.

Ecuación 4. Diseño de Experimentos ETAPA 1

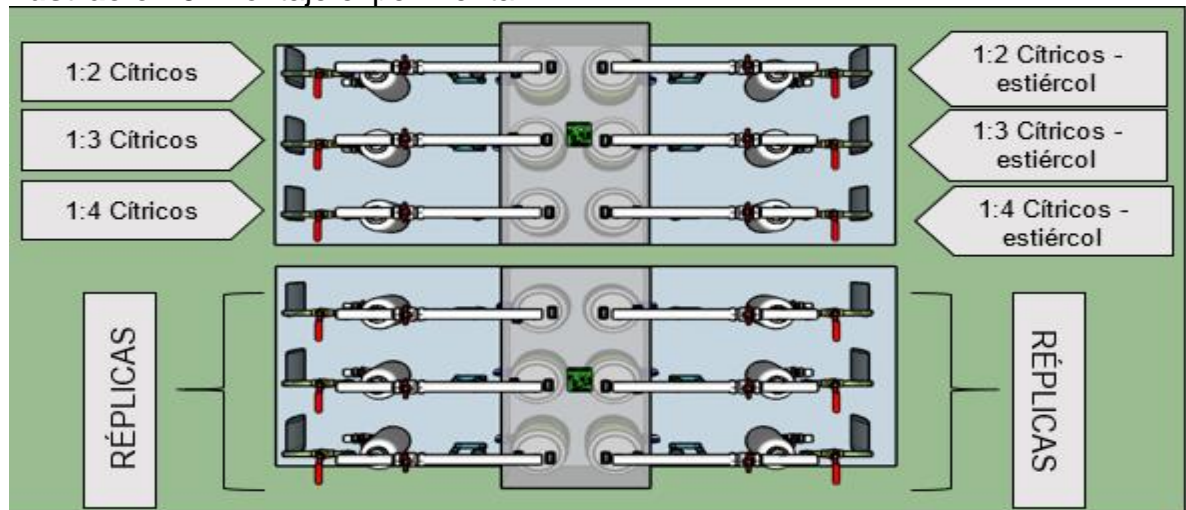
$$N_{trat} = \prod \#Niveles * \#Experimentos$$

$$N_{trat} = 3 * 2 * 2 = 12 \text{ experimentos}$$

Fuente: elaboración propia

Como lo indica la **Ecuación 4** la ETAPA 1 consistió en 12 montajes experimentales de acuerdo a las variables y niveles anteriormente mencionados tal y como se muestra en la **Ilustración 5**.

Ilustración 5. Montaje experimental ETAPA 1



Fuente: elaboración propia mediante SketchUp 2019

Al no evidenciar cambios significativos en el desplazamiento volumétrico en los montajes experimentales durante la ETAPA 1, se realizó una segunda etapa (ETAPA 2), en donde se descartaron las mezclas que contenían únicamente como sustrato residuos cítricos. Por otro lado, se retiró una parte del lodo generado en los reactores que contenían residuos cítricos-estiércol y se mezclaron con un lodo granular que proviene de un reactor metanogénico activo.

2.2.2 Etapa 2. Esta etapa inició al finalizar la ETAPA 1 y tuvo una duración de 20 días

2.2.2.1 Variables. La variable independiente a modificar es el tipo de sustrato que se utilizará dentro del proceso y la adición de distintos componentes al mismo (residuos cítricos, estiércol animal, lodo granular) mientras que las variables dependientes de respuesta son la concentración de biogás y metano producido. El sustrato evaluado en la ETAPA 2 se presenta a continuación:

- Sustrato compuesto por residuos cítricos-estiércol bovino-lodo granular activado (sustrato-cosustrato-inóculo)

2.2.2.2 Niveles de la variable independiente a modificar. Se mantuvieron las mezclas provenientes de la Etapa 1 (proporciones sustrato/agua 1:2, 1:3 y 1:4), y a cada mezcla se le adicionó la misma cantidad de lodo granular tal y como se puede ver en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Mezclas Diseño de Experimentos Etapa 2

Mezclas Proceso Digestivo Etapa 2			
Tipo de Sustrato	Sustrato: agua 1:2 (p/p)	Sustrato: agua 1:3 (p/p)	Sustrato: agua 1:4 (p/p)
Residuos Cítricos- Estiércol- Lodo	- Mezcla ETAPA 1 (1 parte Residuos cítricos - estiércol 2 partes Agua) -Lodo granular activado	- Mezcla ETAPA 1 (1 parte Residuos cítricos- estiércol 3 partes Agua) - Lodo granular activado	- Mezcla ETAPA 1 (1 parte Residuos cítricos- estiércol 4 partes Agua) - Lodo granular activado

Fuente: elaboracion propia

2.2.2.3 Número de tratamientos. Para determinar el número de tratamientos se empleó un diseño de experimentos de tipo factorial, que como se muestra en la **Ecuación 5**, implica la productoria del número de variables, niveles y el número de experimentos. Se estimó realizar dos experimentos (prueba original y réplica) con el fin de determinar el porcentaje de error entre los experimentos, así como generar variables de respuesta más precisas.

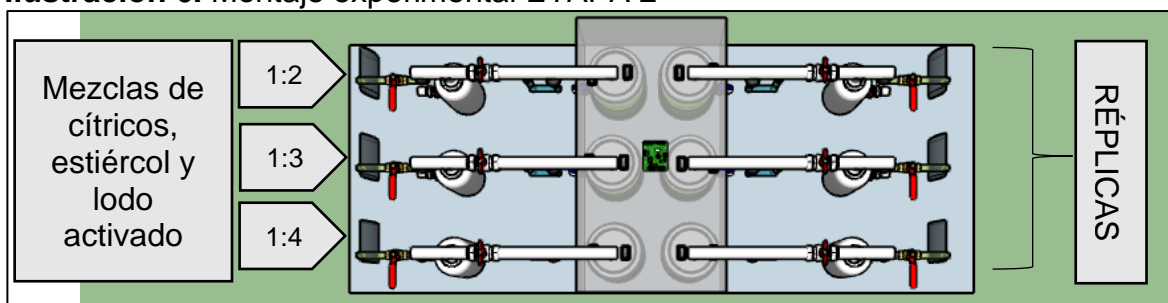
Ecuación 5. Diseño de Experimentos ETAPA 2

$$N_{trat} = \prod \#Niveles * \#Experimentos$$
$$N_{trat} = 1 * 3 * 2 = 6 \text{ experimentos}$$

Fuente: elaboración propia

Como lo indica la **Ecuación 5** la ETAPA 2 consistió en 6 montajes experimentales de acuerdo a las variables y niveles anteriormente mencionados tal y como se muestra en la **Ilustración 6**.

Ilustración 6. Montaje experimental ETAPA 2



Fuente: elaboración propia mediante SketchUp 2019

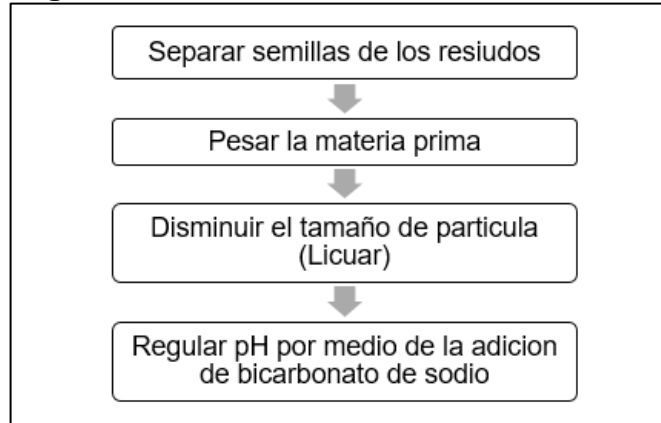
2.3 ELABORACION DE LAS MEZCLAS FINALES PARA EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Para la elaboración de las mezclas finales que ingresaron al proceso de digestión anaerobia se realizó la consideración de algunos parámetros para cada una de las etapas del proceso y que son mencionadas a continuación.

2.3.1 Etapa 1. En la ETAPA 1 se consideró el acondicionamiento de uno de los sustratos que ingresan al reactor (residuos cítricos) acorde a las condiciones óptimas de operación y la adición de un cosustrato (estiércol bovino) para las mezclas anteriormente mencionadas en el inciso **2.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS**.

2.3.1.1 Acondicionamiento del sustrato. El residuo cítrico (sustrato) debe cumplir con ciertos parámetros y características para que sea apto para la digestión anaerobia, estas características influyen en todas las etapas y deben ser medidas y controladas al ingreso del reactor, durante la digestión anaerobia y al final del proceso. Los tratamientos del sustrato (residuo cítrico) se expresan a en la **Figura 5**.

Figura 5. Acondicionamiento de sustrato



Fuente: elaboración propia

El primer paso consistió en la separación de las semillas presentes en los residuos y a continuación se realizó el pesaje de la materia prima, una vez pesadas las mezclas se adicionó agua en las proporciones establecidas en la sección anterior para cada uno; con el fin de disminuir el tamaño de las partículas sólidas se licuó la mezcla hasta obtener una consistencia de lodo granular. Al tratarse con materias primas correspondientes a residuos cítricos, el pH de la mezcla fue bajo (4.5-5.5) indicando valores elevados de acidez, por lo tanto, se reguló el pH a neutro (6.5-7.5) añadiendo una solución de bicarbonato de sodio al 6% (60mg/l), tal y como se puede ver en la **Ilustración 7**.

Ilustración 7. Adición de bicarbonato



Fuente: elaboración propia

2.3.1.2 Adición de estiércol Bovino. Se consideró la adición de estiércol bovino a la mezcla de residuos previamente tratada ya que la digestión conjunta de ambos residuos ha presentado mejores resultados dentro de los rangos mesofílicos y termofílicos del proceso de digestión anaerobia según referencias bibliográficas (Rodríguez y Hernández, Sánchez, Cendales Ladino). De acuerdo con Cendales “la combinación eficiente de diferentes tipos de desechos orgánicos biodegradables puede incrementar la producción de biogás, además de incrementar el valor

fertilizante del fango digerido por la conservación del contenido de nutrientes”⁴⁶. El estiércol bovino se recolectó de un frigorífico de la ciudad de Bogotá y está compuesto principalmente por excreta y orines de animal frescos; no se realizó ningún pretratamiento a este componente y fue adicionado en una proporción 1:2 p/p residuo cítricos/ estiércol respectivamente, tal y como se indica en el inciso **3.2.1.3** del presente trabajo.

2.3.2 Etapa 2. Para la ETAPA 2 se consideró la adición de un inóculo que contara con los microorganismos necesarios para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia, la adición de una solución reductora que otorgara capacidad tampón (alcalinidad) a las mezclas, adicionalmente un medio mineral que brindara macro y micronutrientes a las mismas. A continuación se enuncian detalladamente cada uno de estos parámetros

2.3.2.1 Adición de Inóculo. Para determinar si se debe adicionar un inóculo se revisaron y analizaron diferentes bibliografías en las cuales se determinan las características del inóculo, así como las proporciones adecuadas para su adición. Es importante que en la digestión anaerobia y en especial en el proceso de metanogénesis, se utilice un inóculo activo que provenga de un proceso metanogénico que se encuentre en estado estable; se adicionó este inóculo con el fin de disminuir el tiempo de estabilización de los sustratos y a su vez de suministrar un medio conocido que cuente con diversidad microbiana y en particular bacterias metanogénicas que puedan degradar el sustrato evaluado. Según Cárdenas es importante conocer la cantidad de inóculo agregado, la procedencia de este y su afinidad con el nuevo sustrato con el fin de garantizar menores tiempos de arranque en los reactores, obtener mayor actividad biológica y con ello mayor producción de metano en el biogás.⁴⁷

Se seleccionó como inóculo un lodo granular proveniente del reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) de la planta de tratamiento de agua residual de la empresa de alimentos; este lodo se caracteriza por encontrarse en un estado estable y por contar con la diversidad microbiana necesaria para degradar al sustrato proveniente de la ETAPA 1. El lodo granular se produce mediante la digestión anaerobia de las aguas residuales de la empresa, la cual produce aproximadamente 631 m³ de agua residual⁴⁸.

2.3.2.2 Adición de Solución Reductora. Para asegurar que las mezclas finales en la ETAPA 2 tengan capacidad tampón y puedan resistir los cambios de pH del sistema, esto con el fin de evitar que el proceso de reacción se acidifique y

⁴⁶ CENDALES-LADINO, Edwin Darío. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. En: Bdigital [En línea]. Bogotá, Colombia: Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, 2011, p 8. [Consultado: 28 de Junio de 2020]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/4100/>

⁴⁷ CARDENAS-CLEVES, Op. Cit., p 99

⁴⁸ Informe mensual PTAR: Junio. Indicador Clave (KPI). [Excel]. Junio 2019 [Corporación Anónima]

con ello se inhiba el proceso de metanogénesis, se elaboró una solución reductora que le otorgó a los sustratos capacidad tampón; la concentración de la solución reductora se puede ver en el **ANEXO C-Preparación del medio mineral y solución reductora**. La cantidad de solución reductora en ml que se debe adicionar al reactor se determinó mediante la **Ecuación 6**.

Ecuación 6. Volumen solución Reductora

$$V_{Reductora} = V_{Liquido} * 0,06$$

Fuente: CENDALES LADINO, Edwin Darío. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. En: Bdigital [En línea]. Bogotá, Colombia: Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, 2011, p.58 [Consultado: 28 de Junio de 2020]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/4100/>

2.3.2.3 Adición de Medio Mineral. Con el fin de garantizar la presencia de los macro y micronutrientes necesarios en la digestión anaerobia, se elaboró un medio mineral sintético que aportara los componentes más importantes que necesitan las bacterias metanogénicas para su desarrollo y crecimiento, las soluciones empleadas y sus respectivas concentraciones se pueden ver en el **ANEXO C- Preparación del medio mineral y solución reductora**. La cantidad del medio mineral (Balch) en ml que se debe adicionar al reactor se determinó mediante la **Ecuación 7**.

Ecuación 7. Volumen solución medio mineral sintético

$$V_{MedioBalch}(ml) = V_{liquido}(ml) - V_{lodo}(ml) - V_{residuos}(ml) - V_{reductora}(ml)$$

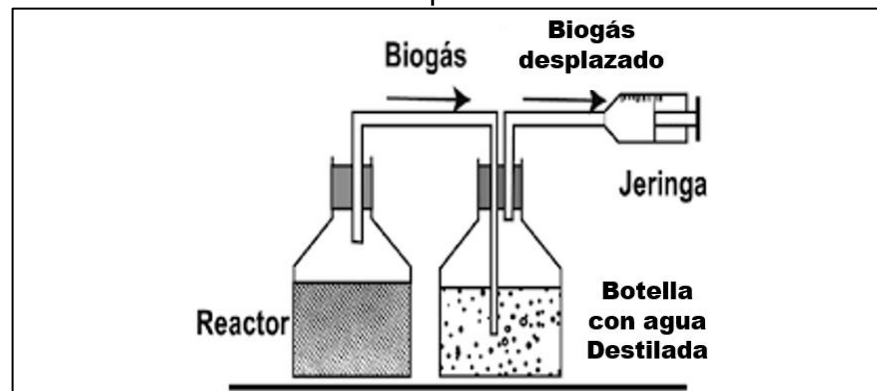
Fuente: CENDALES LADINO, Edwin Darío. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. En: Bdigital [En línea]. Bogotá, Colombia: Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, 2011, p.58 [Consultado: 28 de Junio de 2020]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/4100/>

2.4 SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA

Se mencionan en este inciso todos los parámetros de operación y la construcción y el acondicionamiento de los montajes experimentales, donde se llevó a cabo el proceso de digestión anaerobia.

2.4.1 Acondicionamiento de los reactores. Se evaluarán las condiciones de operación para la producción de biogás realizando la construcción de los montajes experimentales individuales y colectivos. Para cuantificar el gas producido en la etapa experimental se empleó el método volumétrico de desplazamiento de agua que se caracteriza por ser una alternativa simple y de bajo costo, se adecuó este método al montaje siguiendo el diseño que se observa en la **Ilustración 8**; los detalles que se tuvieron en cuenta para cada montaje (individual y colectivo) son mencionados más adelante.

Ilustración 8. Metodo de desplazamiento volumetrico



Fuente: MODIFICADO, CARDENAS-CLEVES, Lina Marcela; PARRA-OROBIO, Brayan Alexis; TORRES-LOZADA, Patricia y VASQUEZ-FRANCO, Carlos Humberto. Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. En: Revista ION [En línea]. Cali, Colombia, 2016, vol.29, nro.1 p.95-108 [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2016000100009&lng=en&nrm=iso. ISSN: 0120-100X. DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>.

2.4.1.1 Montaje individual. El montaje para cada experimento consta de 3 componentes: Un recipiente de vidrio de 4 litros, el cual es el elemento en donde se llevaron a cabo todas las reacciones biológicas y las etapas de digestión anaerobia (reactor), un recipiente plástico de 1 litro que contiene agua destilada donde el gas es almacenado a medida que se produce, con el fin cuantificar la cantidad de gas producido bajo el método de desplazamiento de agua; finalmente una bolsa colectora de gases que será utilizada al momento de finalizar el experimento para almacenar el gas previamente acumulado en el recipiente de plástico, de esta bolsa se determinará la composición de metano del gas generado. Cada uno de estos elementos se conectó mediante tubería de PVC de ½" (12 mm) a excepción de la bolsa colectora, la cual se conectó al montaje mediante una manguera de 3/8" (8 mm); el acople entre esta manguera y el tubo se realizó mediante un adaptador tubo-manguera. A continuación, se explican detalladamente las adaptaciones que se realizaron a cada elemento del montaje experimental:

➤ **Recipiente de vidrio (Reactor).** Se acopló al recipiente de vidrio una llave de paso la cual ejerce la función de punto de muestreo a la hora de medir parámetros in-situ como pH y AGV's durante todo el tiempo de retención del sustrato en el reactor; se garantizó que este punto no presentara posibles fugas o salidas del sustrato dentro del reactor, colocando empaques de caucho en ambos costados del recipiente y sellando los bordes con silicona transparente marca Sista. En la tapa de este recipiente se realizaron 3 perforaciones: una perforación del tamaño de $\frac{1}{2}$ " para la salida del gas producido (conexión al tubo PVC), y 2 perforaciones de 2 mm para la entrada de 2 sondas de temperatura que medirán la temperatura dentro de las 2 fases del reactor. Las adaptaciones del reactor se pueden observar en la **Ilustración 9**.

Ilustración 9. Adaptacion del Reactor de Vidrio
Montaje Experimental



Fuente: elaboración propia

➤ **Recipiente de plástico.** El recipiente de plástico es el elemento del montaje en donde se cuantificará la cantidad de gas producido, mediante el volumen de agua destilada desplazado por este gas durante el experimento. Este elemento contó con una instalación que consiste en un tubo de 5 cm conectado a una válvula de paso de $\frac{1}{2}$ ", por donde se esperaba que saliera el agua desplazada a medida que se genera el gas, se garantizó que este punto no presentara posibles fugas o salidas de agua, colocando empaques de caucho en ambos costados del recipiente y sellando los bordes con silicona transparente marca Sista. En la tapa de este recipiente se realizó una perforación del tamaño de $\frac{1}{2}$ " para la entrada del gas producido proveniente del reactor (mediante la conexión al tubo PVC); las adaptaciones anteriormente mencionadas al recipiente de plástico se encuentran en la **Ilustración 10**.

Ilustración 10. Recipiente plástico para la medición del gas por desplazamiento de agua



Fuente: elaboración propia

- **Bolsa colectora de gases.** Como bolsa recolectora de gases se utilizaron bolsas de drenaje urinario “cystoflo” de 2000 ml ante la dificultad de conseguir gasómetros para cada uno de los 18 montajes experimentales; se descartaron las bolsas recolectoras de gases Tedlar debido a su elevado costo unitario junto con la necesidad de contar con un mínimo de 12 bolsas. Se utilizó la bolsa cystoflo ya que representa una alternativa económicamente viable (bajo costo unitario para una cantidad elevada de experimentos) y permite almacenar con éxito en un periodo corto de tiempo el gas generado. Esta bolsa se encuentra conectada mediante manguera a una válvula cheque de 3/8” la cual permanece cerrada hasta que el experimento finalice, a su vez la válvula en su otro extremo se encuentra enlazada a la conexión general del montaje mediante la conexión con manguera y un adaptador tubo-manguera, como se muestra en la **Ilustración 11**.

Ilustración 11. Bolsa Colectora de gases montaje individual



Fuente: elaboración propia

➤ **Conexión Tubería-PVC.** La conexión de la tubería entre los 3 elementos anteriormente mencionados consta de 2 codos, 2 Tees “T”, 2 adaptadores hembra, 2 adaptadores tubo-manguera, 2 racores de ¾” a ½” y una (1) válvula o cheque, todos estos elementos son de diámetro nominal ½” y están hechos en PVC. Para observar la producción de gas dentro del reactor se adaptó un tubo en U con una manguera de 3/8” de tal forma que uno de sus extremos quede expuesto a la presión atmosférica. El tubo en U fue llenado inicialmente con agua, de tal forma que cuando la presión del reactor supere a la presión atmosférica (indicativo de que el gas se está produciendo), se genere un diferencial de presiones y de alturas dentro del tubo en U; la presión dentro del reactor se libera abriendo la válvula o cheque de ½”, la cual controla la entrada del gas hacia el recipiente plástico con agua destilada. La válvula de paso se deja abierta hasta que el tubo en U tenga la misma altura en ambos lados, acumulándose el gas en el recipiente de plástico. La construcción de la tubería del montaje experimental se encuentra en el **ANEXO D- Construcción de tubería montajes experimentales** y se puede observar en la **Ilustración 12.**

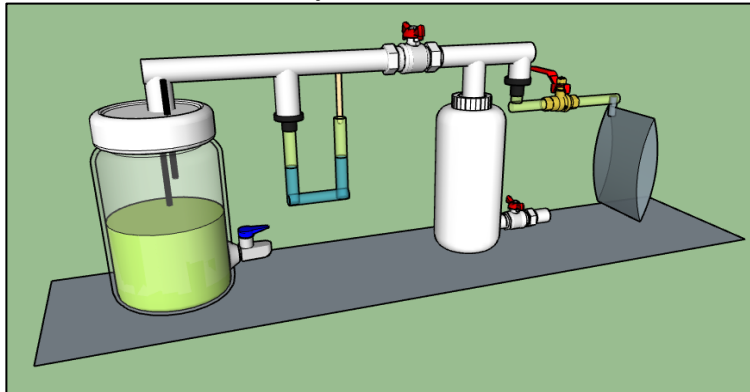
Ilustración 12. Conexiones de tubería PVC de los elementos del montaje experimental



Fuente: elaboración propia

Es importante resaltar que antes de realizar el diseño de experimentos con las mezclas y sustratos anteriormente mencionados, se realizaron distintas pruebas de fugas a cada uno de los elementos del montaje experimental con el fin de identificar posibles puntos de fuga que puedan afectar al proceso de producción de biogás, especialmente al proceso metanogénico que es estrictamente anaerobio. De no controlarse estos posibles puntos de fugas además de afectar directamente al proceso metanogénico se pueden generar desviaciones en las mediciones del volumen desplazado de agua en el recipiente plástico y la concentración de metano del biogás en la bolsa colectora. El montaje experimental individual completo final que fue utilizado para cada uno de los experimentos se muestra en la **Ilustración 13.**

Ilustración 13. Montaje individual

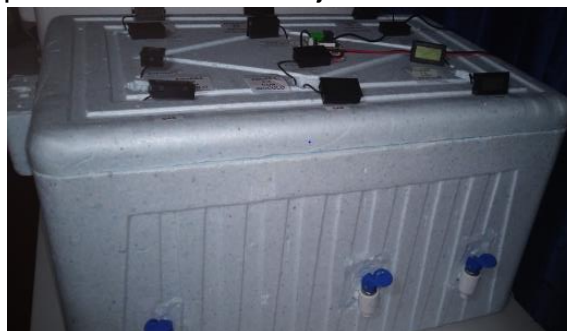


Fuente: elaboración propia mediante SketchUp 2019

2.4.1.2 Montaje colectivo. El montaje colectivo de los 18 experimentos se separó en dos etapas, por lo cual se construyeron únicamente 12 montajes individuales que componen el montaje colectivo, para lo cual, se tuvieron dos factores importantes dentro del proceso de metanogénesis: temperatura y agitación, a continuación, se explica detalladamente las consideraciones que se tuvieron en cuenta para cada uno de estos factores y su incidencia en el montaje colectivo experimental:

- **Temperatura.** Con el fin de garantizar la temperatura óptima para el proceso de metanogénesis en el rango mesófilo (temperatura cercana a los 35°C) en los 12 montajes, se construyeron 2 incubadoras, las cuales fueron hechas a partir de dos neveras de poliestireno expandido de 60L, se seleccionó el poliestireno como material ya que este es utilizado como aislante térmico en diferentes procesos y por lo tanto permite disminuir la tasa de transferencia de calor o las pérdidas generadas desde la fuente de energía hacia el medio ambiente. Dentro de la incubadora se colocaron únicamente los reactores, adicionalmente se realizaron perforaciones para extraer los puntos de muestreo, generar paso al cableado de los termómetros de los reactores y realizar las conexiones con la tubería PVC, tal y como se puede observar en la **Ilustración 14.**

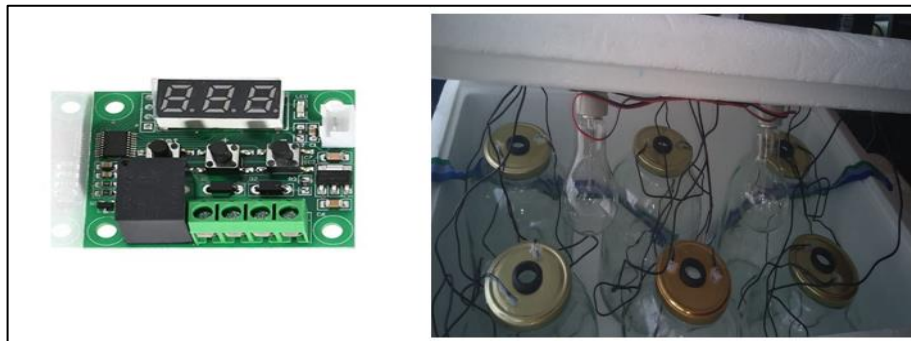
Ilustración 14. Incubadora de poliestireno del montaje colectivo



Fuente: elaboración propia

Como fuente de calor se utilizaron dos bombillas incandescentes de 150 W para cada incubadora, mientras que la temperatura dentro de la misma fue controlada mediante un termostato de referencia W1209 compuesto por una sonda (colocada dentro de la incubadora) y un relé de accionamiento mecánico, estos 2 elementos se encargaron de realizar el control de temperatura apagando o encendiendo los bombillos cuando sea necesario. El termostato fue programado para que dentro de las incubadoras se controlara la temperatura en un rango máximo con los bombillos encendidos de 38°C, a su vez dentro de su programación se estableció una histéresis de 0.5° C de tal manera que si la temperatura de la incubadora disminuía hasta los 37.5°C, el sistema encendiera los bombillos elevándose nuevamente la temperatura. Se puede observar el termostato utilizado y la instalación de la fuente de calor en la **Ilustración 15**.

Ilustración 15. Termostato W1209 e instalacion del sistema de calentamiento en incubadora

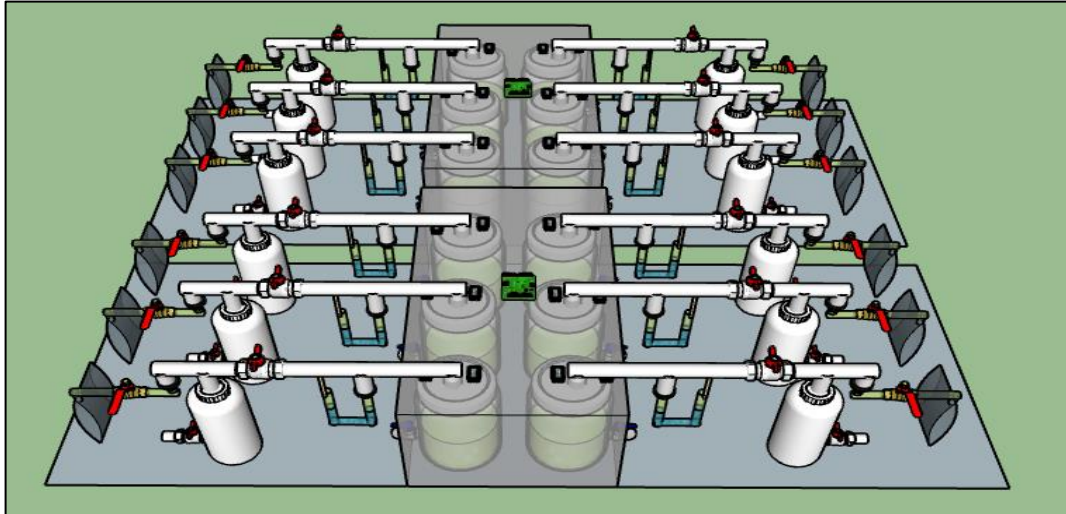


Fuente: elaboración propia

➤ **Agitación.** Se decidió no implementar el efecto de la agitación dentro del montaje experimental debido a la dificultad de implementar agitadores manuales de aspas dentro de las incubadoras de poliestireno y en los reactores, a su vez no se utiliza agitación mecánica, magnética, ni recirculación con bombas por costos (precio elevado en la compra de motores, planchas de agitación y bombas centrifugas para 12 montajes).

Con estos 2 parámetros evaluados se realizaron los 2 montajes experimentales colectivos finales, con los cuales se realizó el diseño experimental, estos montajes se encuentran ilustrados en la **Ilustración 16**; adicionalmente el costo total de todos los elementos necesarios para realizar los montajes experimentales individuales y colectivos se encuentra en el **ANEXO E. Instrumentos y materiales para la construcción de los montajes experimentales**

Ilustración 16. Montaje colectivo



Fuente: elaboración propia mediante SketchUp 2019

2.5 DIGESTION ANAEROBIA

Durante el proceso de digestión anaerobia se realizó el seguimiento de diferentes parámetros importantes para el análisis del efecto de estas sobre la producción de biogás y su correspondiente contenido de metano.

2.5.1 Temperatura. La temperatura de cada uno de los montajes experimentales fue medida utilizando dos termómetros analógicos con sonda tal y como se muestran en la **Tabla 8**, estos 2 termómetros fueron colocados dentro de cada reactor, uno en cada una de las 2 etapas heterogéneas que se presentan dentro del sistema (gas y sustrato) con el fin de observar la variabilidad de temperaturas dentro de estos dos puntos de muestreo. Se registró la temperatura en intervalos de dos días para cada uno de los montajes experimentales durante los 50 días de retención del experimento y se graficaron los datos a partir del promedio de temperatura entre el experimento original y su réplica para cada día evaluado (**Graficas 5,6,9 y 10**), junto con el cálculo de la desviación estándar para cada valor promedio representado en las gráficas mediante barras de error verticales.

Tabla 8. Especificacion tecnica Termometro de Sonda

Elemento de medicion	Especificaciones Tecnicas
	Rango de Temperatura: -50°C - +70°C Precisión: ±1°C Sensibilidad de Temperatura: 0.1°C

Fuente: elaboración propia

2.5.2 Tiempo de retención hidráulico. Se calculó el tiempo de retención hidráulico (TRH) que representa el tiempo mínimo que debe permanecer una unidad de carga orgánica dentro de un digestor anaerobio. El TRH es dependiente de la temperatura bajo la siguiente ecuación (**Ecuación 8**).

Ecuación 8. Tiempo de retencion hidraulico

$$\text{TRH} = -51,227 \text{Ln}(T \text{ } ^\circ\text{C}) + 206,72$$

Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME). Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. [En línea]. Bogotá, Colombia: UPME, 2003, Informe Final, [Consultado: 24 de Marzo de 2020]. Disponible en: <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1306>

2.5.3 pH. Se determinó este parámetro extrayendo pequeños volúmenes de muestra (25 ml) in-situ de cada uno de los reactores, midiendo el pH de cada muestra extraída mediante un medidor de pH de referencia PH-009(I)A de la marca RongZhan cuyas especificaciones se pueden observar en la **Tabla 9**. Se midieron los valores de pH en intervalos de dos días durante los 50 días de duración del experimento y se graficaron los datos a partir del promedio de pH entre el experimento original y su réplica para cada día evaluado (**Graficas 7 y 11**), junto con el cálculo de la desviación estándar para cada valor promedio representado en las gráficas mediante barras de error verticales.

Tabla 9. Especificación Técnica medidor de pH

Elemento de medicion	Especificaciones Tecnicas
	<p>Intervalo de medicion de pH: 0 -14 Precision: ±0, 1pH Resolucion: 0.1°C Temperatura de funcionamiento: 0-50°C</p>

Fuente: elaboración propia

2.5.4 Ácidos Grasos Volátiles y Alcalinidad (AGV's y TAC). Se realizó la medición de los ácidos grasos volátiles extrayendo pequeños volúmenes de muestras in-situ de cada reactor cada 2 días. Se realizó la cuantificación de AGV's y alcalinidad mediante titulación con H₂SO₄ 0.1N y NaOH 0.1N en base al primer

procedimiento del **ANEXO A. Protocolo para la determinación de ácidos grasos volátiles y alcalinidad.**, con el objeto de observar si a lo largo del proceso existía una posible acumulación de los mismos causando una inestabilidad dentro del sistema, a su vez también se determina el cociente entre estos 2 parámetros (AGV/TAC) que representa un indicador de estabilidad en el proceso de digestión anaerobia. Una concentración elevada de AGV's inhibe el proceso de metanogénesis, indicado que las relaciones entre microorganismos de las etapas acidogénica y acetogénica no son las adecuadas debido a la acumulación de estos compuestos intermediarios generados por los primeros microorganismos (AGV's generados en etapa acidogénica).

Se determinaron los AGV's y la alcalinidad en intervalos de dos días durante los 50 días de duración del experimento y se graficaron los datos a partir del promedio de la relación AGV/TAC entre el experimento original y su réplica para cada día evaluado (**Graficas 8 y 12**), junto con el cálculo de la desviación estándar para cada valor promedio representado en las gráficas mediante barras de error verticales.

2.6 CUANTIFICACIÓN TEÓRICA DE METANO (DETERMINACION DE LA CANTIDAD DE BIOGAS GENERADO Y LA COMPOSICION DE METANO)

Se realizaron diferentes procedimientos y métodos para la cuantificación de gas en el montaje experimental y la determinación de la composición de metano en el biogás, los cuales son mencionados a continuación:

2.6.1 Método Volumétrico por Desplazamiento de Agua. Para cuantificar el gas producido. El método de desplazamiento de agua consiste en determinar la cantidad de gas generado en el proceso de metanogénesis mediante el desplazamiento de un volumen conocido de agua destilada al inicio del diseño experimental y que se encuentra dentro del recipiente plástico de cada montaje experimental. El gas que ingresa al recipiente plástico ejerce presión hacia el líquido desplazando un volumen específico de agua, que es equivalente al volumen de gas que ingreso al recipiente. Este volumen de agua sale del recipiente abriendo la válvula o cheque de ½" que se encuentra conectado a este, la válvula se vuelve a cerrar hasta que exista una estabilización de la presión en el montaje experimental (sin diferencia de alturas en el tubo en U). Se procuró medir el volumen desplazado de agua para cada montaje experimental con una probeta de 25 ml en un intervalo de 2 días, sin embargo, como se especifica en la sección de resultados del presente trabajo, este método no fue satisfactorio debido al tamaño del reactor y el tiempo de la experimentación.

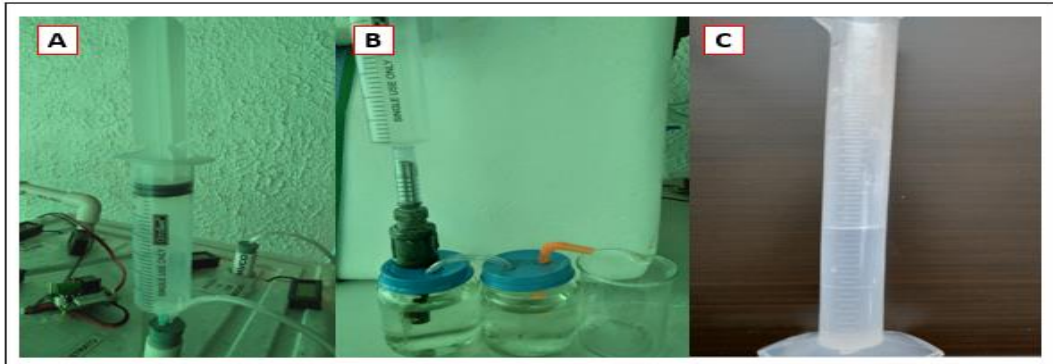
2.6.2 Prueba de inflamabilidad. Consiste en acercar un mechero a la salida de gas para observar la llama que se produce, según Varnero⁴⁹ "cuando el biogás tiene

⁴⁹ VARNERO, Op. cit., p. 16.

un contenido de metano superior al 45% es inflamable” por lo cual, es un estimativo de la composición del gas obtenido; el mismo autor, especifica que un indicador de la llama ser “azulada y de buena consistencia”⁵⁰. Esta prueba se realizó al final de la etapa metanogénica, únicamente a los experimentos con lodo activado y estiércol animal.

2.6.3 Método Volumétrico para la determinación de la composición de metano en el biogás. Este método volumétrico consiste en determinar la cantidad de metano que existe en el gas generado en el proceso de metanogénesis, mediante el desplazamiento de un volumen de agua después de haber sido inyectada una muestra de gas de volumen conocido (imagen A), previamente esta muestra fue introducida a una solución de NaOH o KOH en concentración 2N para eliminar el contenido de CO₂ que existe dentro de la muestra (imagen B), finalmente se mide la cantidad de agua desplazada por el gas y el cociente entre estos 2 resultados (volumen desplazado/ volumen muestra) es el equivalente a la composición de metano en el gas (imagen C), el registro fotográfico de la secuencia de imágenes anteriormente mencionada se puede observar en la **Ilustración 17**.

Ilustración 17. Metodo volumetrico composicion de metano en el biogas



Fuente: elaboración propia

Este método fue empleado al final de la etapa metanogénica en los experimentos con lodo activado mediante el montaje experimental que se observa en la **Ilustración 18**. La construcción de este montaje experimental se encuentra en el **ANEXO F- Construcción del montaje para la cuantificación de metano**

⁵⁰ Ibid., p. 112

Ilustración 18. Montajes experimentales para la determinación de la composición de metano en el biogas.

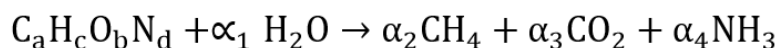


Fuente: elaboración propia

2.6.4 Evaluación teórica del contenido de metano. Se realizó una consulta bibliográfica en la cual se analizó el rendimiento y cantidad de metano obtenido por otros investigadores específicamente a partir de residuos de frutas cítricas, así como el cálculo teórico de la cantidad de metano mediante el modelo Buswell el cual, se calcula a partir de la composición elemental del sustrato, este modelo es completamente ideal bajo el supuesto de que toda la carga orgánica es transformada en metano y no tiene en cuenta el crecimiento microbiano, sin embargo, funciona como una aproximación teórica para el cálculo del potencial de producción de metano. A continuación, se expresa el modelo y las ecuaciones simplificadas por Aresta, Dibenedetto y Dumeignil⁵¹:

El modelo parte de la ecuación general (**Ecuación 9**) para la producción de metano mediante la suposición de una conversión completa.

Ecuación 9. Ecuación general de Buswell



Fuente: ARESTA, Michele; DIBENEDETTO, Angela y DUMEIGNIL Franck. Biorefinery - From Biomass to Chemicals and Fuels - 18.1 Laboratory-Scale Biomethane Potential Tests. [En línea] De Gruyter, 2012. [Consultado el 15 de Julio de 2020]] Disponible en <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U4G1Z2/biorefinery-from-biomass/laboratory-scale-biomethane> e-ISBN 978-3-11-026028-1

⁵¹ ARESTA, Michele; DIBENEDETTO, Angela y DUMEIGNIL Franck. Biorefinery - From Biomass to Chemicals and Fuels - 18.1 Laboratory-Scale Biomethane Potential Tests. [En línea] De Gruyter, 2012. [Consultado el 15 de Julio de 2020]] Disponible en <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U4G1Z2/biorefinery-from-biomass/laboratory-scale-biomethane> e-ISBN 978-3-11-026028-1

Dónde:

- a, b, c, d representan la composición molar de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, respectivamente, conocido porque el compuesto tomado en consideración es una molécula conocida o porque un análisis elemental se ha realizado previamente. Estos coeficientes se calcularon a partir de los porcentajes en masa reportados por Rojas y Florez⁵² en su artículo “Valorización de residuos de frutas para combustión y pirolisis” para los residuos de fruta, y los reportados por Sanchez, Laines y Sosa⁵³ en el artículo “Estimación del potencial teórico de biogás en una granja de producción lechera de Tabasco” para el estiércol vacuno. A continuación, se expresa el cálculo de dichos coeficientes:

Ecuación 10. Cálculo coeficientes de Buswell

$$a, b, c, d = \frac{\sum(M_s * \%X)}{2(PM)}$$

Donde:

- $\sum(M_s * \%X)$ es la sumatoria de la cantidad en peso para cada sustrato por el porcentaje correspondiente al elemento a calcular.
- PM es el peso molecular del elemento.

Fuente: elaboración propia

- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ representan los coeficientes estequiométricos para el equilibrio químico de la ecuación. El balance de masa de los cuatro elementos presentes en la ecuación dará la solución para los coeficientes α .

Ecuación 11. Sistema de ecuaciones para coeficientes estequiométricos

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_2 + \alpha_3 \\ b + 2\alpha_1 = 4\alpha_2 + 3\alpha_4 \\ c + \alpha_1 = 2\alpha_3 \\ d = \alpha_4 \end{cases}$$

Fuente: ARESTA, Michele; DIBENEDETTO, Angela y DUMEIGNIL Franck. Biorefinery - From Biomass to Chemicals and Fuels - 18.1 Laboratory-Scale Biomethane Potential Tests. [En línea] De Gruyter, 2012. [Consultado el 15 de Julio de 2020]] Disponible en <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U4G1Z2/biorefinery-from-biomass/laboratory-scale-biomethane> e-ISBN 978-3-11-026028-1

⁵² ROJAS y FLÓREZ, Op. Cit., p.46-48

⁵³ SÁNCHEZ PEDRERO, Lorena Mercedes; LAINES CANEPA, José Ramón; SOSA OLIVER, José Aurelio. Estimación del potencial teórico de biogás en una granja de producción lechera de Tabasco. En: Ciencia UANL [En línea], México, 2016, vol. 19, nro 80, p. 54-57. [Consultado 15, Julio 2020] Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/11247/1/Documento7.pdf> ISSN 1405-9177

Como lo expresan ARESTA, Michele; DIBENEDETTO, Angela y DUMEIGNIL⁵⁴ el sistema de ecuaciones se resuelve “recordando que, en condiciones estándar, un mol de gas ocupa 22.415 L, y considerando el peso atómico de los elementos y el volumen en condiciones estándar”. La ecuación simplificada para el cálculo de las cantidades teóricas de biogás y metano producidos se expresa a continuación **(Ecuación 12)**:

Ecuación 12. Calculo de cantidad teórica de biogás y metano producidos.

$$B_{o-biogás} \left[\frac{m_n^3}{kg} \right] = \frac{22.415a}{12a + b + 16c + 14d} \quad B_{o-methane} \left[\frac{m_n^3}{kg} \right] = \frac{\frac{4a + b - 2c - 3d}{8} * 22.415}{12a + b + 16c + 14d}$$

Fuente: ARESTA, Michele; DIBENEDETTO, Angela y DUMEIGNIL Franck. Biorefinery - From Biomass to Chemicals and Fuels - 18.1 Laboratory-Scale Biomethane Potential Tests. [En línea] De Gruyter, 2012. [Consultado el 15 de Julio de 2020]. Disponible en <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U4G1Z2/biorefinery-from-biomass/laboratory-scale-biomethane> e-ISBN 978-3-11-026028-1

Finalmente se realizó la multiplicación del parámetro calculado por la cantidad en peso de carga orgánica suministrada a cada uno de los experimentos para determinar la carga orgánica con mayor potencial teórico de producción de metano.

⁵⁴ ARESTA, Michele; DIBENEDETTO, Angela y DUMEIGNIL Franck. Op. Cit., p.406

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presentan todos los resultados obtenidos para este trabajo de grado junto al análisis de los mismos, abarcando la selección de la mezcla de residuos que será utilizada como sustrato mediante una matriz de selección, la composición de las mezclas finales que ingresaron al proceso digestivo para cada etapa, la medición de los parámetros in-situ durante el proceso, la cuantificación de biogás y metano experimental y la selección teórica de la carga orgánica con mayor contenido de metano.

3.1 SELECCIÓN DE LA MEZCLA DE RESIDUOS

La empresa procesa mensualmente una cantidad de residuos de fruta aproximada de 4600 kg⁵⁵, estos residuos son generados como subproducto de la extracción de jugo, el cual es utilizado dentro del proceso de producción principal. Actualmente la mayor parte de dichos residuos están compuestos por cascara, semillas y bagazo de naranja, limón y mandarina como se muestra en la **Ilustración 19**, debido a que estas son las frutas con mayor demanda en la producción. El presente proyecto está enfocado principalmente en el aprovechamiento de estos residuos, se estudió también la adición de un inóculo y un cosustrato, especificando más adelante cada una las concentraciones escogidas y empleadas para cada uno de los montajes realizados bajo una revisión bibliográfica.

Ilustración 19. Residuos de fruta



Fuente: elaboración propia

3.1.1 Matriz de selección. Con el objetivo de seleccionar la proporción de la mezcla de residuos de fruta que se adecue al proceso de digestión, se tomaron diferentes parámetros a evaluar empleando el modelo de matriz de selección los

⁵⁵Informe mensual de residuos: Junio. Indicador Clave (KPI). [Excel]. Junio 2019 [Corporación Anónima]

cuales son registrados en la **Tabla 10** junto con el porcentaje de valoración asignada arbitrariamente por los investigadores según su importancia de acuerdo con la revisión bibliográfica.

Tabla 10. Parámetros matriz de selección y porcentajes

PARÁMETRO		PORCENTAJE
a.	Disponibilidad del residuo	20%
b.	Porcentaje de residuo (Rendimiento)	25%
c.	Pretratamientos que se le deben realizar a la materia prima	20%
Análisis Físicoquímicos (Caracterización)		
d.	Alcalinidad	5%
e.	AGV's	5%
f.	Sólidos Totales	5%
Parámetros Teóricos (Revisión Bibliográfica)		
g.	Relación carbono nitrógeno	10%
h.	Micronutrientes aportados por el residuo	10%
TOTAL		100%

Fuente: elaboración propia

En la **Tabla 11** se muestra la matriz de selección junto con la calificación de los parámetros para cada tipo de residuo, esta calificación fue asignada con base al criterio de los investigadores y valores óptimos establecidos por la bibliografía de la siguiente forma:

- 1 = No cumple con el parámetro.
- 2 = Cumple parcialmente con el parámetro.
- 3 = Cumple en su mayoría con el parámetro.
- 4 = Cumple con el parámetro.

Tabla 11. Matriz de selección

Residuo	a.	b.	c.	d.	e.	f.	g.	h.	Total	Porcentaje sobre el total
Cáscara de limón	4	4	3	3	1	2	2	1.25	3.025	40%
Cáscara de mandarina	3	3	2	2	3	3	3	1.5	2.550	33%
Cáscara de naranja	1	3	1	2	2	1	4	2.75	2.075	27%
Total									7,650	100%

Fuente: elaboración propia

A continuación, se especifican los criterios de selección, así como la razón por la cual se asignó el respectivo porcentaje y calificación en cada uno de los residuos de fruta.

3.1.1.1 Disponibilidad de los recursos. En cuanto a la demanda del residuo se le asignó una importancia del 20% sobre el total, este factor es influyente en la escogencia del sustrato, debido a que el recurso o materia prima usada en la digestión anaerobia debe estar disponible en las cantidades requeridas para poder realizar dicho proceso; así mismo, se espera que se pueda aprovechar aquellos residuos que tienen mayor demanda productiva teniendo en cuenta que a mayor cantidad de residuos, mayor recursos son empleados para su disposición final.

Tabla 12. Kg de residuos producidos durante el primer semestre de 2020

Fruta	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Fruta Prom	Residuos Prom
Limón	4829	2280	1793	3206	4246	1641	2999.17	2099.42
Mandarina	4415	2904	4113	2050	2158	1992	2938.67	1763.20
Naranja	401	796	945	600	1152	1155	841.50	504.90

Fuente: Modificado, a partir de Solicitud y pedidos de fruta: Primer semestre. Control. [Excel]. Junio 2020 [Corporación Anónima]

La empresa procesa diferentes líneas de producción dependiendo de la demanda y su lugar de recepción, es decir, no existe un procesamiento continuo de cada línea y existen periodos dentro de los cuales no se generarán residuos de ciertas frutas.

Como se observa en la **Tabla 12** altas cantidades de limón y mandarina fueron solicitadas por la empresa durante el primer semestre del año 2020 debido a que los productos que contienen esta fruta tienen alta demanda y por lo tanto su procesamiento es regular. El limón tiene mayor demanda dentro del proceso productivo comparado con la mandarina, por lo tanto, la calificación asignada para este residuo fue de 4 mientras que para los residuos de mandarina fue de 3. El producto final que contiene pulpa de naranja no se consume nacionalmente (es exportado) implicando tanto bajas cantidades de residuos como periodos intermitentes en su procesamiento, por lo cual se le asignó una calificación de 1. Dichas calificaciones fueron consignadas en la **Tabla 11**.

3.1.1.2 Rendimiento del residuo. A este parámetro se le asignó una importancia del 25% sobre el total debido a que se desea aprovechar la mayor cantidad de residuos generados posible. En la **Tabla 13** se consignan las cantidades en peso de fruta y pulpa requeridas para un lote de producto, así como el porcentaje en peso de los residuos sólidos para cada fruta.

Tabla 13. Porcentaje de residuos sólidos en cítricos

Fruta	Cantidades en peso / 1 lote			% de residuos sólidos
	Kg de fruta	Kg de pulpa extraída	Kg de residuos	
Limón	400	120	280	70.0%
Mandarina	500	200	300	60.0%
Naranja	198	80	118	59.6%

Fuente: Modificado, a partir de: Solicitud y pedidos de fruta: Primer semestre. Control. [Excel]. Junio 2020 [Corporación Anónima]

Como se muestra en **Tabla 13** el porcentaje de residuos sólidos es alto para las tres frutas, esto implica que tras su procesamiento se generan altas cantidades de desechos sólidos que pueden ser aprovechables para un segundo uso como la producción de biogás por medios anaeróbicos. El mayor porcentaje registrado fue el del limón, por lo cual se asigna en la matriz de selección (**Tabla 11**) una calificación de 4 para este residuo; la mandarina y la naranja contienen porcentajes de residuos similares, sin embargo, no tan altos como el limón, por lo cual su calificación asignada fue de 3.

3.1.1.3 Pretratamientos que se le deben realizar al residuo. A este parámetro se le asignó un porcentaje del 20% ya que los pretratamientos implican más recursos que abarcan tanto tiempo como equipos y costos.

Como se mostró anteriormente en la **Ilustración 19**, los residuos de mandarina y naranja están compuestos por la cáscara, la semilla y el bagazo; la semilla se debe separar debido a que aumenta el porcentaje de sólidos totales dentro del sistema impidiendo la movilidad de las bacterias dentro del sustrato⁵⁶ y por lo tanto afectando su actividad enzimática, así mismo, la presencia de semillas genera una mayor dificultad para el proceso de trituración y licuado de la mezcla. En el caso de la naranja se asignó una calificación de 1, mientras que para la mandarina fue de 2 debido a que el grosor de la cáscara es menor en comparación con los otros residuos haciendo el proceso de licuado más sencillo. Debido a que la limadura del limón es usada como materia prima para otra línea del proceso, el residuo presenta ausencia de la parte externa de la cascara implicando así una disminución en el tiempo de licuado, por lo tanto, la calificación asignada para este residuo fue de 3

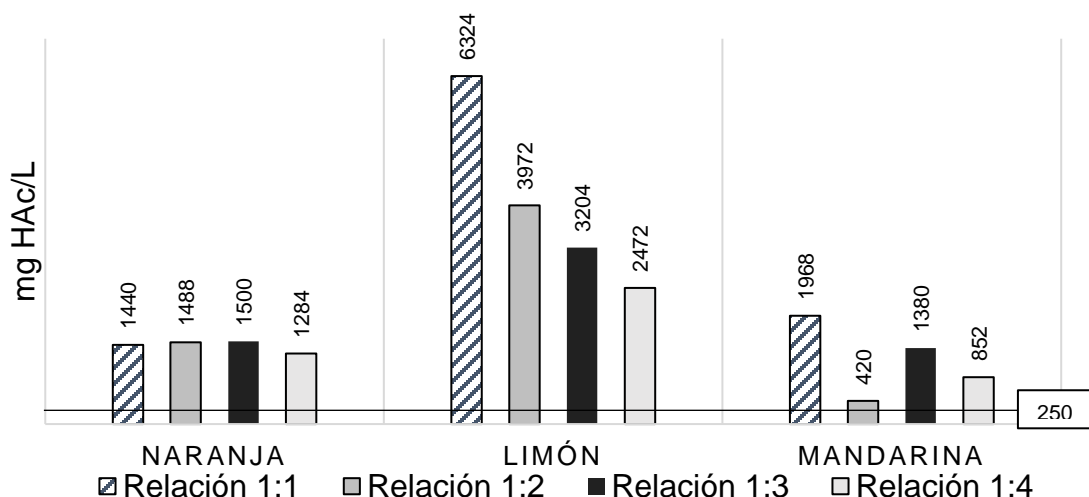
3.1.1.4 Análisis fisicoquímicos (Caracterización). Los resultados obtenidos para la determinación de ácidos grasos volátiles, acidez y sólidos totales de las muestras iniciales fueron consignados en el **ANEXO G** del presente trabajo, a cada uno de estos parámetros se le asignó un valor de 5% sobre la calificación asignada y se muestran de forma gráfica. Como se planteó en el primer capítulo, es importante

⁵⁶ VARNERO, Op. cit., p. 30.

conocer la cantidad de ácidos grasos volátiles en el sustrato, ya que representan aquellos productos intermedios que serán transformados en metano durante la digestión anaerobia. Según el Varnero⁵⁷ “en un sistema anaerobio óptimo, la concentración de los AGV en el sustrato se encuentra usualmente en el rango de 50-250 mg HAc/l”, altos contenidos de AGV’s pueden afectar el pH de la mezcla disminuyendo la actividad microbiana presente en el sustrato.

Como se puede observar en la **Gráfica 1** las concentraciones de ácidos grasos volátiles presentes en las tres frutas sobrepasaron el valor de AGV’s óptimo para digestión anaerobia; los valores más bajos de AGV’s correspondieron al residuo de la cáscara de mandarina específicamente en la proporción de fruta/agua 1:2 con un valor de 420 mg HAc/l, para éste residuo le asignó una calificación de 3; teniendo en cuenta que en todas las proporciones de mandarina el contenido de AGV’s permaneció por debajo de 2000 mg HAc/l se asignó una calificación de 2 ya que según Bote⁵⁸ a esta concentración se inhiben las bacterias metanogénicas; por último, se asignó un valor de 1 en la matriz de selección para el residuo de limón en concordancia con los altos valores obtenidos en todas las proporciones para éste residuo. Según referencias bibliográficas la concentración de AGV’s debería disminuir a medida que se diluyen las mezclas (aumento de proporción de agua en la mezcla), sin embargo este comportamiento no se presentó en los resultados experimentales para los residuos de naranja y mandarina, debido a posibles fallas realizadas en la dilución de las mezclas o una incorrecta titulación en el proceso (**inciso 2.1.1.3**), adicionalmente al no realizar replicas para cada mezcla como se mencionó anteriormente no se pudo contrastar los resultados experimentales obtenidos.

Gráfica 1. Acidos grasos presentes en mezclas de cítricos y agua



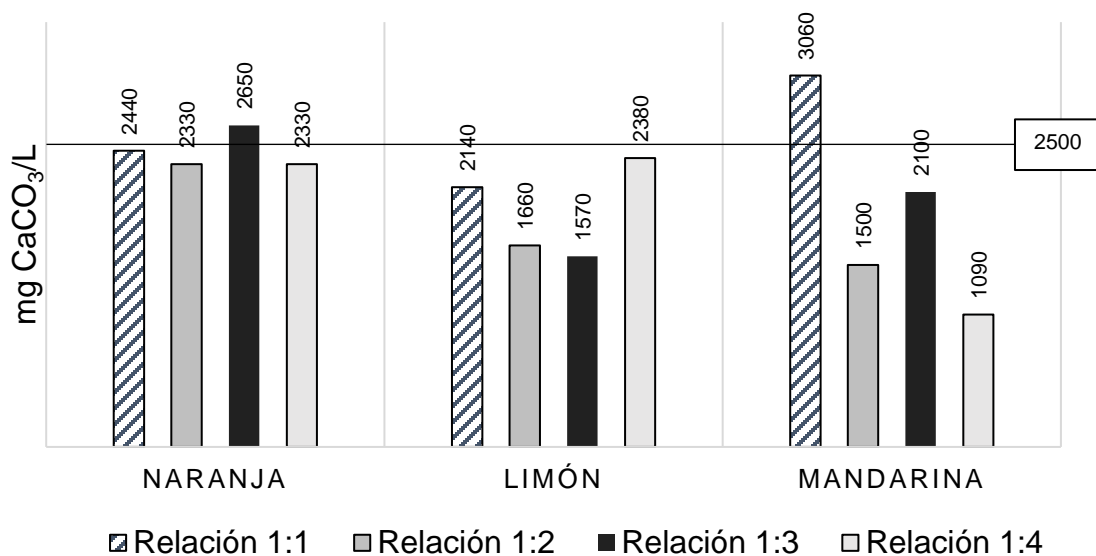
Fuente: elaboración propia

⁵⁷ *Ibíd.*, p. 47.

⁵⁸ BOTE. Op. Cit., p 9.

Según Angulo, Lozano, González, Sánchez y Ojeda ⁵⁹ “la alcalinidad óptima para digestores es aquella que se encuentra entre 2500-5000 mg CaCO₃/l, valores muy bajos implican menor resistencia a cambios del pH en el interior del reactor mientras que valores altos inhiben la digestión anaerobia”. Como se observa en la **Gráfica 2** se obtuvo un valor de 2650 mg CaCO₃/l para los residuos de naranja en proporción 1:3, este valor fue el único entre el intervalo óptimo, sin embargo, los valores obtenidos para las demás proporciones de este residuo fueron más cercanos que los encontrados en los residuos de limón y mandarina. Las calificaciones para este parámetro se encuentran consignadas en la **Tabla 11**.

Gráfica 2. Alcalinidad de mezclas de frutas cítricas y agua



Fuente: elaboración propia

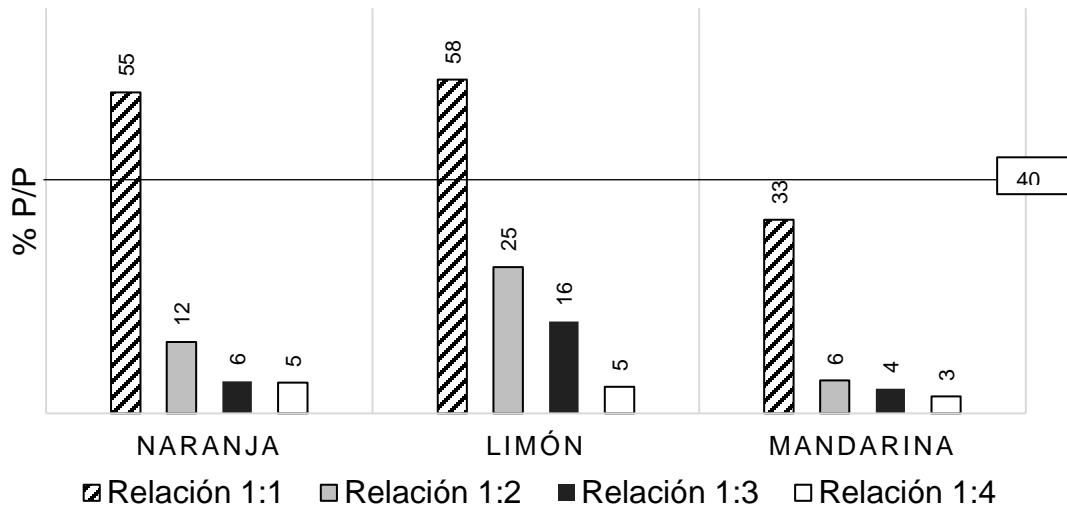
Los sólidos totales deben ser suficientes para permitir el contacto con las bacterias metanogénicas sin inhibir su movilidad, según Varnero⁶⁰ en digestores discontinuos el porcentaje óptimo se encuentra en el intervalo de 40 a 60%. Como se puede observar en la **Gráfica 3** la proporción 1:1 fue la proporción con mayor cantidad de sólidos totales para los tres residuos, en el caso de la naranja y limón se encontraron dentro del rango óptimo, aunque fueron significativamente mayores en el caso del limón a estos dos residuos se les asignó un valor de 2 ya que sólo una relación se encuentra en el rango óptimo. Los valores más bajos se obtuvieron para la mandarina, por lo cual se asignó la calificación de 1 en la matriz de selección.

⁵⁹ ANGULO, Julian; LOZANO, Luisa; GONZALEZ, Angel; SANCHEZ, Eduardo Y OJEDA, Karina. Monitoring anaerobic digester parameters of biogas production from corn (Zea mays) leaf and stalk residual biomass. En: Contemporary Engineering Sciences. [En línea] Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Cartagena: Cartagena, Colombia. 2018. vol.11, nro. 26 p. 1291-1299 (1297) [Consultado 21, Marzo 2020] Disponible en: <https://doi.org/10.12988/ces.2018.8389>.

⁶⁰ VARNERO, Op. cit., p. 4.

Ningún valor sobrepasó la cantidad de sólidos totales por lo tanto los tres son aptos para permitir la movilidad de las bacterias metanogénicas.

Gráfica 3. Sólidos totales de mezclas de frutas cítricas y agua



Fuente: elaboración propia.

3.1.1.5 Revisión bibliográfica de parámetros teóricos. Los parámetros teóricos evaluados fueron la relación de micronutrientes en los cítricos anteriormente mencionados.

Tabla 14. Micronutrientes de Cítricos

Residuo	Micronutrientes			
	Magnesio (mg)	Calcio (mg)	Hierro (mg)	Zinc (mg)
Naranja	213	33	1.3	0.5
Mandarina	12	35	0.3	0.2
Limón	8	19	0.5	0.1

Fuente: elaboración propia con información extraída de: INSTITUTO COLOMBIANO DE BIENESTAR FAMILIAR. Tabla composición Alimentos Colombianos [En línea]. Colombia: ICBF, 2018 p. 56-61 [Consultado: 5 de Marzo de 2020]. Disponible en: https://www.icbf.gov.co/sites/default/files/tcac_web.pdf. ISBN 978-958-623-199-2

Los micronutrientes evaluados fueron magnesio, calcio, hierro y zinc, su importancia según Mancillas, Rodríguez y Ríos⁶¹ radica en que “provocan estabilidad

⁶¹ MANCILLAS-SALAS, Sergio; RODRÍGUEZ-DE LA GARZA, José; RÍOS-GONZÁLEZ, Leopoldo. Bioestimulación de la Digestión Anaerobia. En: Acta Química Mexicana [En línea]. Depto. de Biotecnología. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Coahuila: Coahuila, México. 2012. Vol. 4, nro. 8 p. 3 [Consultado 21, Marzo 2020] Disponible en: <https://docplayer.es/7080828-Bioestimulacion-de-la-digestion-anaerobia.html>

membranal, transferencia de nutrientes y ahorro de energía en bacterias productoras de metano”, los mismos autores establecen que las bacterias metanogénicas requieren de estos micronutrientes de la forma: $Mg = Ca > Fe > Zn$. Como se puede observar en la **Tabla 14** los residuos ordenados de mayor a menor cantidad de micronutrientes son: naranja>mandarina>limón por lo cual se les asignó valores descendientes a sus calificaciones, las cuales fueron consignadas en la **Tabla 11**. La importancia de estos elementos como micronutrientes en el medio de reacción dentro del proceso de digestión anaerobia a es mencionada en el inciso **3.2.2.3** del presente trabajo.

Tabla 15. Relación C:N y Material Volátil de Residuos de frutas cítricas

Residuo	Parámetros	
	Relación C: N	Material Volátil %
Naranja	20:0.9	71.08
Mandarina	20:0.13	83.02
Limón	20:0.21	77.10

Fuente: elaboración propia con información extraída de: ROJAS, Andrés y FLÓREZ, Ciliana. VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE FRUTAS PARACOMBUSTIÓN Y PIRÓLISIS. En: Revista Politécnica. [En línea] Bogotá, Colombia: Politécnico Grancolombiano, 2019, vol. 15, nro.28, p 42-53. [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1395/1164> ISSN 2256-5353

Como se expresa en el ítem **1.3.7** del presente trabajo la relación C:N óptima para el proceso de digestión anaerobia es de 20:1, la fruta que más se aproxima a la relación óptima es la naranja, por lo cual su valor en la matriz de selección fue de 4, seguida por la mandarina con una calificación de 3 y finalmente el limón representó una proporción de nitrógeno alejada de la unidad por lo cual se le asignó un valor de 2, estas calificaciones fueron consignadas en la **Tabla 11**.

La revisión bibliográfica del material volátil establecido en la tabla no se tuvo en cuenta para la selección de la mezcla debido a que en el anterior ítem del presente trabajo se estudió experimentalmente la cantidad de ácidos grasos volátiles presentes en los residuos de las frutas estudiadas, sin embargo, es importante destacar el alto porcentaje de material volátil reportado para las cascarras de estos cítricos, debido a que según Rojas y Florez⁶² “parte del material volátil presente en la mayoría de las cáscaras es de bajo peso molecular” y como se ha mencionado anteriormente este material corresponde a ácidos grasos como el propiónico y butírico, los cuales, son transformados durante la acetogénesis en ácido acético y posteriormente en metano durante la metanogénesis, indicando así una alta conversión en metano para estos residuos orgánicos.

⁶² ROJAS y FLÓREZ, Op. Cit., p.46-48

3.1.2 Mezcla de frutas. Para determinar la proporción en la mezcla de frutas se estableció el cociente entre el resultado total para cada residuo y la sumatoria de resultados como se puede observar en la **Tabla 11**, con el fin de facilitar el pesaje de las muestras se determinó que la mezcla de frutas corresponde a la proporción de: **40% cáscara de limón, 35% cáscara de mandarina y 25% cáscara de naranja.**

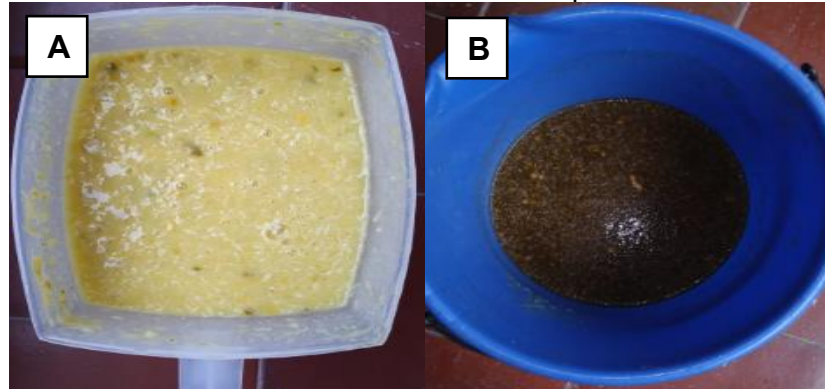
3.2 MEZCLAS FINALES

Se mencionan en este inciso las condiciones, tratamientos y clases de componentes que fueron adicionados a las mezclas finales tanto en la ETAPA 1 como en la ETAPA 2. A partir de estas mezclas finales y acorde al diseño de experimentos anteriormente mencionado, se realizó la fase experimental del presente trabajo de grado.

3.2.1 Etapa 1. Antes de iniciar la fase experimental se realizaron diferentes tratamientos con el fin de adecuar la materia prima (mezcla de residuos cítricos) a las condiciones óptimas de operación al inicio del proceso digestivo, las cuales son presentadas a continuación

3.2.1.1 Tamaño de partícula. En cuanto al tamaño de partícula se disminuyó por medio del proceso de licuado; según Rivas, Faith y Guillén⁶³ “una reducción de tamaño de los desechos sólidos a partículas de 10 a 40 mm es necesaria para lograr una mejor accesibilidad biológica y con mejor flujo de sustrato en el proceso”. En la **Ilustración 20** se puede observar la consistencia de lodo obtenida como resultado del tratamiento realizado para la mezcla de residuos cítricos y residuos cítricos-estiércol bovino 1:2 sustrato/agua (imagen A y B respectivamente).

Ilustración 20. Disminución del tamaño de partícula Mezcla 1:2



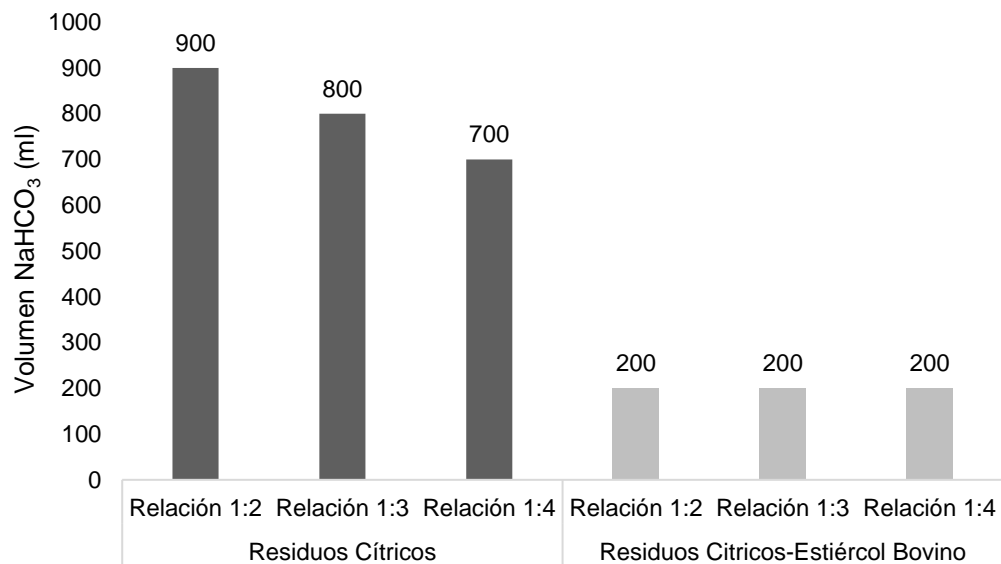
Fuente: elaboración propia

⁶³ RIVAS-SOLANO, Olga; FAITH-VARGAS, Margie; GUILLÉN-WATSON, Rossy. Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. En: Revista Tecnología en Marcha [En línea] Costa Rica: 2010, vol. 23, nro 1, p. 39-39. [Consultado 28, Junio 2020] Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4835857>

3.2.1.2 Dosis Alcalinizante. Como se puede consultar en la fundamentación teórica de presente documento el pH ideal para la digestión anaerobia oscila en valores cercanos a la neutralidad, pH ácidos pueden implicar la inhibición de la producción de metano en el digestor como resultado de un alto contenido de AGV's, al tratarse de materias primas cítricas el pH de las mezclas de fruta se mantuvo ácido inicialmente, por lo tanto se debe adicionar una sustancia alcalinizante a la mezcla que permita regular su acidez durante el proceso. La sustancia empleada fue bicarbonato de sodio disuelta manualmente en una concentración de 6 % (60gNaHCO₃/L)⁶⁴.

Como se observa en la **Gráfica 4** los experimentos compuestos únicamente por residuos cítricos requieren volúmenes mayores de dosis alcalinizantes al inicio de la digestión anaerobia debido al pH ácido de estas mezclas, así mismo se puede observar que la cantidad de dosis alcalinizante aplicada es proporcional al contenido de agua en la mezcla; en cuanto a las mezclas compuestas por residuos cítricos y estiércol bovino, se observa que las dosis son mucho menores y constantes, confirmando que el estiércol contribuye a la alcalinización y por lo tanto, a la estabilización del pH de las mezclas al momento de ingresar al reactor anaerobio.

Gráfica 4. Dosis Alcalinizante empleada al inicio de la ETAPA 1



Experimento

Fuente: elaboración propia.

⁶⁴ PÉREZ, Andrea; TORRES, Patricia. Indices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. En: Ingeniería y Competitividad [En línea] Cali, Colombia: Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle, 2008, vol. 10, nro 2, p. 41-52. [Consultado: 28 de Junio de 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2913/291323482002.pdf>. ISSN: 0123-3033

3.2.1.3 Estiércol animal. Rodríguez y Hernández⁶⁵ en su artículo “Efecto de diferentes tipos de estiércol en la codigestión de residuos cítricos” compararon el uso de estiércol proveniente de tres diferentes tipos de animal (Vaca, cerdo y borrego) mezclado con residuos de naranja para la producción de metano y obtuvieron un mayor volumen de producción de biogás y concentración de metano en los reactores que contenían excreta de ganado vacuno (estiércol). En base a esta referencia bibliográfica, se consideró la adición de estiércol bovino al medio con el fin de elevar la producción de biogás en el proceso digestivo.

El estiércol bovino fue proporcionado por Frigoríficos Ble Ltda; y se determinó que la proporción de este residuo debía ser mayor a la de la mezcla de frutas en los experimentos con adición de este mismo, por lo tanto la relación de sustrato/estiércol (residuos cítrico/estiércol) empleada fue de 1:2 con base al artículo “Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares” escrito por Sánchez⁶⁶ en el cual se analizaron dos muestras variando la proporción de estiércol entre 1:2 y 1:3 y se determinó que el reactor con proporción 1:2 presentó mayor producción de metano en comparación con el reactor con relación sustrato/estiércol 1:3.

Durante la experimentación se pudo observar que el estiércol animal actuó como cosustrato ya que aportó macro y micronutrientes, así como suplementó las falencias respecto a la rapidez con la que se acidificaron las muestras tal y como se pudo observar anteriormente en la **Gráfica 4**, este fenómeno se explica y sustenta de forma más detallada en la **sección 3.4** del presente trabajo. Los resultados experimentales obtenidos en la **Grafica 4** reafirman las referencias bibliográficas especialmente a Karapaju y Rintala los cuales determinaron que “la codigestión de los desechos cítricos con algún otro residuo orgánico biodegradable de origen agroindustrial como el estiércol bovino permite superar condiciones inhibitorias del proceso como la acidificación total del sustrato, evidente durante la digestión anaerobia del residuo cítrico”⁶⁷.

⁶⁵ RODRIGUEZ-PIMENTEL, Reyna Isabel y HERNANDEZ-REYES, Adriana. Efecto de diferentes tipos de estiércol en la codigestión de residuos cítricos. En: Revista de Investigación y Desarrollo [En línea] Madrid, España, ECORFAM-Spain. Diciembre, 2018, vol. 4, nro 13, p 29-35 [Consultado: 05 de Marzo de 2020] ISSN 2444-4987 Disponible en: https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Investigacion_y_Development/vol4num13/Revista_de_Investigacion_y_Development_V4_N13.pdf#page=37

⁶⁶ SANCHEZ-REYES, Claudia. Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares. En: Rev. Int. Contam. Ambient [En línea]. México: 2016, vol.32, nro.2, pp.191-198. [Consultado 21, Marzo 2020] Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992016000200191&lng=es&nrm=iso. ISSN 0188-4999. DOI: <http://dx.doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.05>.

⁶⁷ KARAPAJU, P.L.N y RINTALA, Jukka. Thermophilic Anaerobic Digestion for Industrial Orange Waste [En línea]. En: Environmental Technology [En línea]. 2006, vol.27, nro.6 p.623-633 [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en:

Por otra parte, diversos autores y referencias bibliográficas han afirmado que la degradación de diversos sustratos dentro de una misma mezcla permite el desarrollo eficaz del proceso digestivo “debido al comportamiento sinérgico de los cosustratos utilizados, los cuales compensan las falencias que cada uno presenta al realizar el proceso por separado”⁶⁸.

3.2.1.4 Mezclas finales Etapa 1. En la **Tabla 16** se especifican las composiciones de cada una de las mezclas empleadas para la ETAPA 1

Tabla 16. Composición de las mezclas empleadas en la ETAPA 1.

Mezcla	Relación fruta: agua	Porcentaje en peso				
		Agua	Limón	Mandar	Naranja	Estiércol
Residuos Cítricos	Relación 1:2	67%	13%	12%	8%	0%
	Relación 1:3	75%	10%	9%	6%	0%
	Relación 1:4	80%	8%	7%	5%	0%
Residuos cítricos - Estiércol Bovino	Relación 1:2	67%	5%	5%	3%	20%
	Relación 1:3	75%	4%	4%	3%	15%
	Relación 1:4	80%	3%	3%	2%	12%

Fuente: elaboración propia.

3.2.2 ETAPA 2. A las muestras compuestas por residuos cítricos- estiércol bovino provenientes de la ETAPA 1, se les adicionaron distintos componentes (inóculo, solución reductora, medio mineral) con el fin de garantizarle estabilidad al medio en donde se llevan a cabo todas las reacciones del proceso digestivo y con ello favorecer la producción de biogás, estos componentes son mencionadas a continuación.

3.2.2.1 Inóculo de lodo granular activado. Es importante que en la digestión anaerobia y en especial en el proceso de metanogénesis, se utilice un inóculo activo que provenga de un proceso metanogénico que se encuentre en estado estable; se adicionó este inóculo con el fin de disminuir el tiempo de estabilización de los sustratos y a su vez de suministrar un medio conocido que cuente con diversidad microbiana y en particular bacterias metanogénicas que puedan degradar el sustrato evaluado en la ETAPA 2 del proceso de digestión anaerobia. Según Cárdenas, Parra, Torres y Vásquez⁶⁹ es importante conocer la cantidad de inóculo agregado, la procedencia de este y su afinidad con el nuevo

https://www.researchgate.net/publication/6920177_Thermophilic_Anaerobic_Digestion_of_Industria_L_Orange_Waste DOI: 10.1080/09593332708618676

⁶⁸ CENDALES-LADINO, Op. Cit.; p 8.

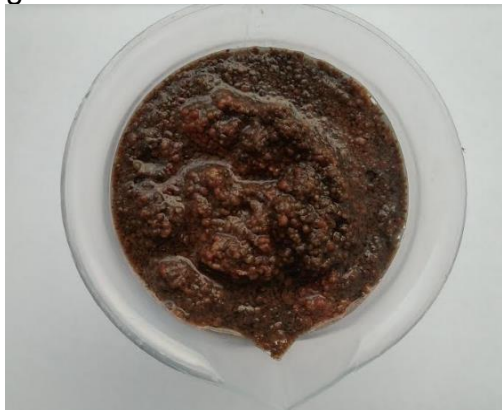
⁶⁹ CARDENAS-CLEVES, PARRA-OROBIO, TORRES-LOZADA y VASQUEZ-FRANCO, Op. Cit., p.99

sustrato con el fin de “garantizar menores tiempos de arranque en los reactores, obtener mayor actividad biológica y con ello mayor producción de metano en el biogás”.

Se seleccionó como inóculo un lodo granular proveniente del reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) de la planta de tratamiento de agua residual de la empresa de alimentos; este lodo se caracteriza por encontrarse en un estado estable y por contar con la diversidad microbiana necesaria para degradar al sustrato de la Etapa 1. El lodo granular se produce mediante la digestión anaerobia de las aguas residuales de la empresa, la cual produce aproximadamente 631 m³ de agua residual⁷⁰.

Para la fase experimental se inóculó la ETAPA 2 con 300 ml del lodo granular activo, esta cantidad representa el 10% del volumen líquido del reactor metanogénico. En la **Ilustración 21** se puede observar una muestra del lodo granular que fue utilizado como inóculo en la ETAPA 2.

Ilustración 21. Muestra de Lodo granular-Inóculo ETAPA 2



Fuente: elaboración propia

3.2.2.2 Solución Reductora. Se determinó que la solución reductora para la ETAPA 2 debe estar compuesta por 80 g/l de NaHCO₃ (Bicarbonato de sodio) y correspondió al 6% de la mezcla total empleada en la ETAPA 2. Esta solución tiene como objetivo brindarle a la mezcla final la suficiente capacidad tampón (alcalinidad), evitando la disminución abrupta del pH (< 6) y con ello la inhibición del proceso digestivo.

3.2.2.3 Medio Mineral. Se estableció que el medio mineral debe estar compuesto por dos soluciones: 15 ml de fosfato mono potásico y 15 ml de una mezcla en solución de cloruro de amonio, cloruro de sodio y cloruro de magnesio

⁷⁰ 3.1.2 Informe mensual PTAR: Junio. Indicador Clave (KPI). [Excel]. Junio 2019 [Corporación Anónima]

mineral, su preparación se estableció en el **ANEXO C**; este medio correspondió al 64% de la mezcla y se aplicó únicamente en la ETAPA 2. La elaboración del medio se basa en el medio mineral realizado por Cendales⁷¹ en la tesis: “*Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable*”; este medio conocido como medio Balch depende de distintas soluciones (KH_2PO_4 , $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_4\text{Cl} - \text{NaCl} - \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$; Resarzurina), y aportará los nutrientes requeridos para una digestión anaerobia óptima.

Se necesita de un medio mineral para que todo el conjunto de bacterias del proceso digestivo cuente con los elementos necesarios y en las proporciones adecuadas para su óptimo crecimiento; a su vez la adición de soluciones minerales permite soportar la carencia de macro y micronutrientes que pueden llegar a presentar algunos tipos de sustratos sólidos⁷²; asimismo para la reacción metanogénica se debe superar la concentración óptima de nutrientes ya que las bacterias metanogénicas se inhiben severamente por la falta de estos⁷³.

Dentro de las soluciones adicionadas a la mezcla final en la ETAPA 2, la solución de fosfato monopotásico (KH_2PO_4) suministra elementos como: Fósforo (P) importante para la formación de ácidos nucleicos, fosfolípidos y Potasio (K) el cual es utilizado por diversas enzimas en el proceso digestivo⁷⁴. La mezcla en solución de cloruros ($\text{NH}_4\text{Cl} - \text{NaCl} - \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) brinda Nitrógeno (N) elemento importante para la formación de nuevas células⁷⁵, Magnesio (Mg) que es necesario para estabilizar ribosomas, membranas celulares, ácidos nucleicos⁷⁶ y Sodio (Na) debido al requerimiento elevado de este elemento de algunas clases de bacterias metanogénicas⁷⁷.

Cabe resaltar que por temas de costos y disponibilidad de materias primas se redujo la elaboración del medio mineral a las dos soluciones anteriormente mencionadas (fosfato mono potásico y mezcla de cloruros) desconsiderándose las soluciones restantes del medio, por lo tanto el medio no se encuentra con los complementos necesarios de nutrientes; Angelidaki⁷⁸ afirma que la ausencia de algunos compuestos o la limitación de nutrientes puede afectar el rendimiento del proceso metanogénico práctico y con ello la producción de biogás

⁷¹ CENDALES-LADINO, ANEXO A

⁷² ANGELIDAKI. Op. Cit. p. 126

⁷³ VARNERO. Op. Cit. p. 35

⁷⁴ ANGELIDAKI. Op. Cit. p. 122

⁷⁵ VARNERO. Op. Cit.; p. 35

⁷⁶ ANGELIDAKI. Op. Cit. p.; 122

⁷⁷ MANCILLAS-SALAS, RODRÍGUEZ-DE LA GARZA y RÍOS-GONZÁLEZ. Op. Cit.; p. 3

⁷⁸ ANGELIDAKI. Op. Cit.; p. 126

De acuerdo a la jerarquía de nutrientes anteriormente mencionada en el inciso **3.1.1.5** del presente trabajo ($Mg = Ca > Fe > Zn$) se garantiza en el medio la presencia de magnesio mediante la adición del cloruro de magnesio ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$), sin embargo no se garantiza la presencia en las proporciones adecuadas de los otros elementos mencionados en la misma jerarquía, de tal manera que sólo se cuenta con cantidades aparentes y que son suministradas por los residuos cítricos y el estiércol bovino. Dentro de la mezcla final en la ETAPA 2, la posible ausencia de hierro (Fe) puede afectar la conversión de ácido acético en metano (reacción acidogénica y metanogénica) y con ello la producción de biogás⁷⁹; adicionalmente la ausencia de algunos elementos como Calcio (Ca), Níquel (Ni) y Cobalto (Co) puede llegar a dificultar la remoción completa de los AGV's⁸⁰; por otra parte se necesitan de otros elementos en pequeñas cantidades (micronutrientes) para enzimas específicas del proceso digestivo tales como Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Vanadio (V) y Selenio (Se)⁸¹.

3.2.2.4 Mezclas finales Etapa 2. Como se mencionó anteriormente para la ETAPA 2 se emplearon como sustrato las mezclas compuestas de residuos cítricos y estiércol bovino provenientes de la ETAPA 1. Se especifican las composiciones de las mezclas empleadas para la ETAPA 2 en la **Tabla 17**.

Tabla 17. Composición de las mezclas empleadas en la **ETAPA 2**.

Mezcla	Relación fruta: agua	Porcentaje en volumen			
		Inóculo	Cítricos-Estiércol	Solución Reductora	Medio Mineral
Residuos Cítricos-Estiércol Bovino -Lodo activo	Relación 1:2	10%	20%	6%	64%
	Relación 1:3	10%	20%	6%	64%
	Relación 1:4	10%	20%	6%	64%

Fuente: elaboración propia

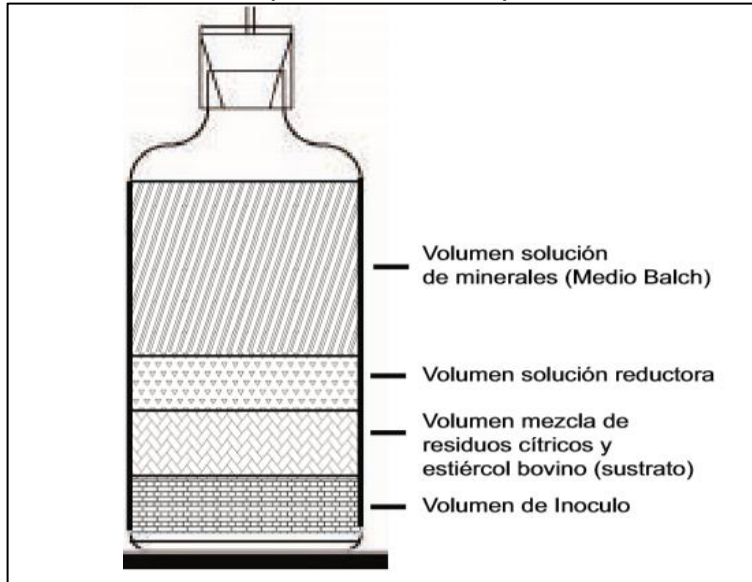
La disposición de cada uno de los compuestos anteriormente mencionados (inoculo, sustrato, en el reactor de la **ETAPA 2**, se realizó en base al procedimiento establecido por Cendales tal y como se ve en la **Ilustración 22**

⁷⁹ MANCILLAS-SALAS, RODRÍGUEZ-DE LA GARZA y RÍOS-GONZÁLEZ. Op. Cit.; p. 2

⁸⁰ Ibid.; p. 3

⁸¹ ANGELIDAKI. Op. Cit. p.; 122

Ilustración 22. Disposición de componentes ETAPA 2



Fuente: CENDALES LADINO, Edwin Darío. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. En: Bdigital [En línea]. Bogotá, Colombia: Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, 2011, p.60 [Consultado: 28 de Junio de 2020]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/4100>

3.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las condiciones de operación se establecieron a partir de la revisión bibliográfica expresada en la fundamentación teórica del presente trabajo, tanto los reactores como la materia prima fueron acondicionados a los parámetros establecidos a continuación:

3.3.1 Acondicionamiento del reactor. Las condiciones establecidas fueron: temperatura en el reactor, aislamiento, agitación, tiempos de cada una de las etapas y se encuentran resumidas en la **Tabla 18**.

Tabla 18. Acondicionamiento del reactor

Condición	Parámetro
Temperatura	Mesofílica (35°C)
Tiempo ETAPA 1	30 días
Tiempo ETAPA 2	20 días
Aislamiento	Si
Agitación	No

Fuente: elaboración propia

Como se expresó en la sección **1.3 FACTORES QUE AFECTAN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**, a temperaturas termofílicas se obtiene mayores valores de concentración de metano en el biogás, mejorando su calidad energética, sin embargo, se decidió operar a condición de temperatura mesofílica (35°C) debido a que las condiciones termofílicas representan mayores recursos financieros y físicos para el proceso; en la misma sección se determina que para temperaturas mesofílicas el tiempo de fermentación varía entre 30 y 60 días, por lo cual se estableció una duración del experimento de 50 días, los cuales fueron distribuidos en dos etapas: una de 30 días que representa las etapas de hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis y una segunda etapa de 20 días de metanogénesis. Los digestores fueron aislados con el fin de disminuir la tasa de transferencia de calor o las pérdidas generadas desde la fuente de energía hacia el medio ambiente.

Respecto a la agitación se omite debido a que diversos autores como Rozzi y Remigi⁸² afirman que “la agitación continua puede dañar las asociaciones sintróficas que se establecen entre los diferentes grupos de microorganismos que intervienen en la digestión anaerobia”, de tal manera que una agitación brusca y continua puede ser una posible condición que inhiba el proceso de metanogénesis.

3.3.2 Tiempo de retención hidráulico. Se determinó el tiempo de retención hidráulico acorde a la **Ecuación 8** que es dependiente de la temperatura; para resolver esta ecuación se seleccionó la temperatura objetivo en la que se realizaron los montajes experimentales (35°C), obteniéndose un resultado de 24.59 días. Según Varnero en un digestor que opera a régimen estacionario, Batch o “discontinuo”, el TRH es el tiempo que transcurre entre la carga del sistema y su descarga⁸³, por lo tanto, representa el tiempo mínimo de duración que necesitan los montajes experimentales para que todo el conjunto de bacterias que se encuentran en el medio realice las etapas de digestión anaerobia. Como se puede ver en el inciso **3.3.1 Acondicionamiento del reactor** el tiempo de experimentación sobrepasa el valor del TRH y lo duplica, de tal manera que no se presentarán limitaciones en el proceso de digestión anaerobia debido al tiempo de duración del experimento.

3.4 DIGESTIÓN ANAEROBIA

Como se explicó en la metodología del presente trabajo debido a la necesidad de acelerar el proceso de metanogénesis por limitaciones de tiempo, se dividió en dos etapas el proceso experimental: La ETAPA 1 correspondió a las dos primeras partes

⁸² ROZZI, A. y REMIGI, E. Methods of assessing microbial activity and inhibition under anaerobic conditions: a literature review. En: Rev Environ Sci Biotechnol [En línea]. Milano, Italy: 2004. Vol. 3, p. 93–115. [Consultado 11, Marzo 2020] Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-004-5762-z> ISSN: 1572-9826

⁸³ VARNERO, Op. cit., p. 41.

de la digestión anaerobia (Hidrólisis y acidogénesis) mientras que en la ETAPA 2 se desarrolló el proceso de acetogénesis y metanogénesis. Los autores Rodríguez y Hernández⁸⁴ expresan la importancia de emplear dos etapas en el proceso de digestión anaerobia con sustratos cítricos, debido a que sustentan que la etapa limitante es la hidrólisis y establecen que es más fácil controlar las condiciones necesarias para el crecimiento de los microorganismos productores en cada etapa de la digestión anaerobia, por su parte Milquez⁸⁵ establece que los sistemas en dos etapas permiten controlar las disminuciones de pH generadas por la producción de ácidos grasos volátiles durante la etapa de acidogénesis, así mismo, evitan la acumulación de hidrógeno no metabolizado que puede llegar a inhibir la metanogénesis. A continuación, se presentan los resultados y los correspondientes análisis para cada uno de los parámetros medidos durante las dos etapas experimentales:

3.4.1 Etapa 1. Durante esta etapa se midieron los siguientes parámetros:

3.4.1.1 Temperatura. Como se habló en las secciones anteriores, la temperatura es un parámetro fundamental para la digestión anaeróbica, ya que de esta depende el tiempo de retención del sustrato y favorece el crecimiento microbiano dentro de los reactores, con el propósito de realizar el seguimiento de la temperatura, se establecieron tres puntos de seguimiento: Temperatura externa, temperatura interna en la fase gaseosa y temperatura interna en la fase líquida (mezcla).

➤ **Temperatura externa.** Como se puede observar en el **ANEXO H** la temperatura externa de los montajes durante la ETAPA 1, se mantuvo a lo largo del tiempo dentro del rango de 37.4 y 38.1°C para todos los montajes experimentales. Esto implica que fue posible mantener la temperatura en el rango de preferencia para los microorganismos mesófilos y por lo tanto el control de temperatura empleado para el proceso funcionó correctamente.

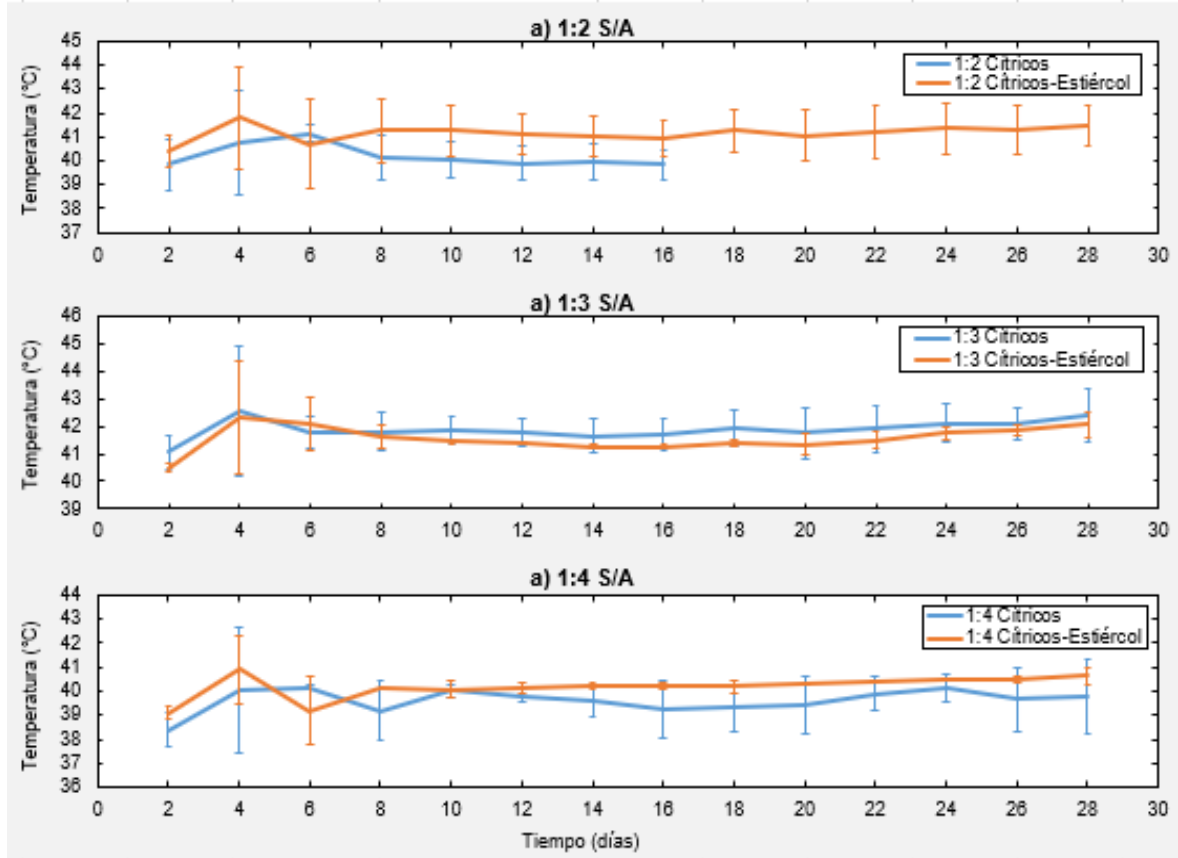
➤ **Temperatura fase gaseosa.** Como se puede observar en el **ANEXO H** la temperatura en la fase gaseosa dentro de cada uno de los montajes durante la ETAPA 1, se mantuvo a lo largo del tiempo dentro del rango de 35.9-42°C para el experimento 1 y 38.9- 44.2°C para el experimento 2. Se estableció para los montajes experimentales en general, que la temperatura en la fase gaseosa de los mismos se estabilizó después de 10 días de haberse iniciado la ETAPA 1, de ahí en adelante se mantuvo constante para cada una de las pruebas; la diferencia de temperaturas que existe en las proporciones sustrato/agua de cada una de las mezclas (1-2°C)

⁸⁴ RODRIGUEZ-PIMENTEL y HERNANDEZ-REYES, Op. Cit., p. 30

⁸⁵ MILQUEZ, Harvey. Digestión anaerobia en dos fases de los residuos de cebolla blanca (*Allium cepa*) y desarrollo de un modelo lineal adaptativo predictivo [En línea]. Tesis de Doctorado en Ciencias en Energía Renovable. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, Yucatán. México: 2017. p. 62-64. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en Repositorio CICY: https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/458/1/PCER_D_Tesis_2017_Milquez_Harvey.pdf

es despreciable y se debe a la disposición de los reactores dentro de la incubadora. Por otra parte, las temperaturas en la fase gaseosa promedio en la ETAPA 1 de cada proporción y la desviación estándar de cada temperatura promedio de se pueden observar en la **gráfica 5**.

Gráfica 5. Temperatura fase gaseosa ETAPA 1

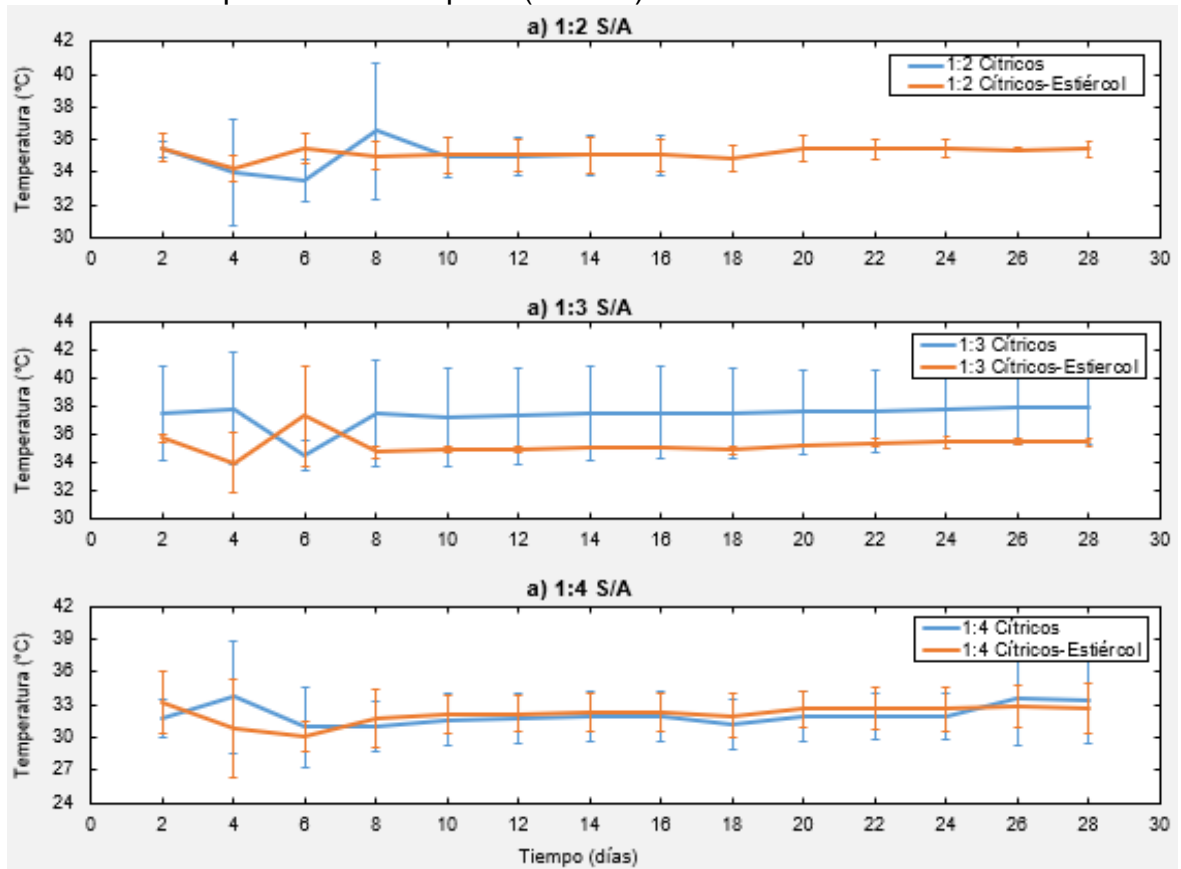


Fuente: elaboración propia

➤ **Temperatura fase líquida (Mezcla):** Como se puede observar en el **ANEXO H** la temperatura en el sustrato dentro de cada uno de los montajes durante la ETAPA 1, se mantuvo a lo largo del tiempo dentro del rango de 29.2-39.5°C para el experimento 1 y 27.7- 40.7°C para el experimento 2, encontrándose todas estas temperaturas dentro del rango mesofílico. Se estableció para los montajes experimentales en general, que la temperatura en la fase gaseosa de los mismos se estabilizo después de 10 días de haberse iniciado la ETAPA 1, de ahí en adelante se mantuvo constante para cada una de las pruebas; se presentan diferencias con las temperaturas de la fase gaseosa debido a la disposición de la fuente de calor en la incubadora, sin embargo las temperaturas de los sustratos se encuentran cercanas a la temperatura óptima para la digestión anaerobia en el rango mesofílico (35°C) en general.

La diferencia de temperaturas promedio que existe en las proporciones sustrato: agua (2°C por máximo) se debe a la disposición de los reactores dentro de la incubadora, sin embargo estas diferencias no son representativas para el proceso indicando el correcto funcionamiento del sistema de control; asimismo, las temperaturas en la fase líquida promedio en la ETAPA 1 de cada proporción y la desviación estándar de cada temperatura promedio de se pueden observar en la **gráfica 6**.

Gráfica 6. Temperatura fase líquida (mezcla) ETAPA 1

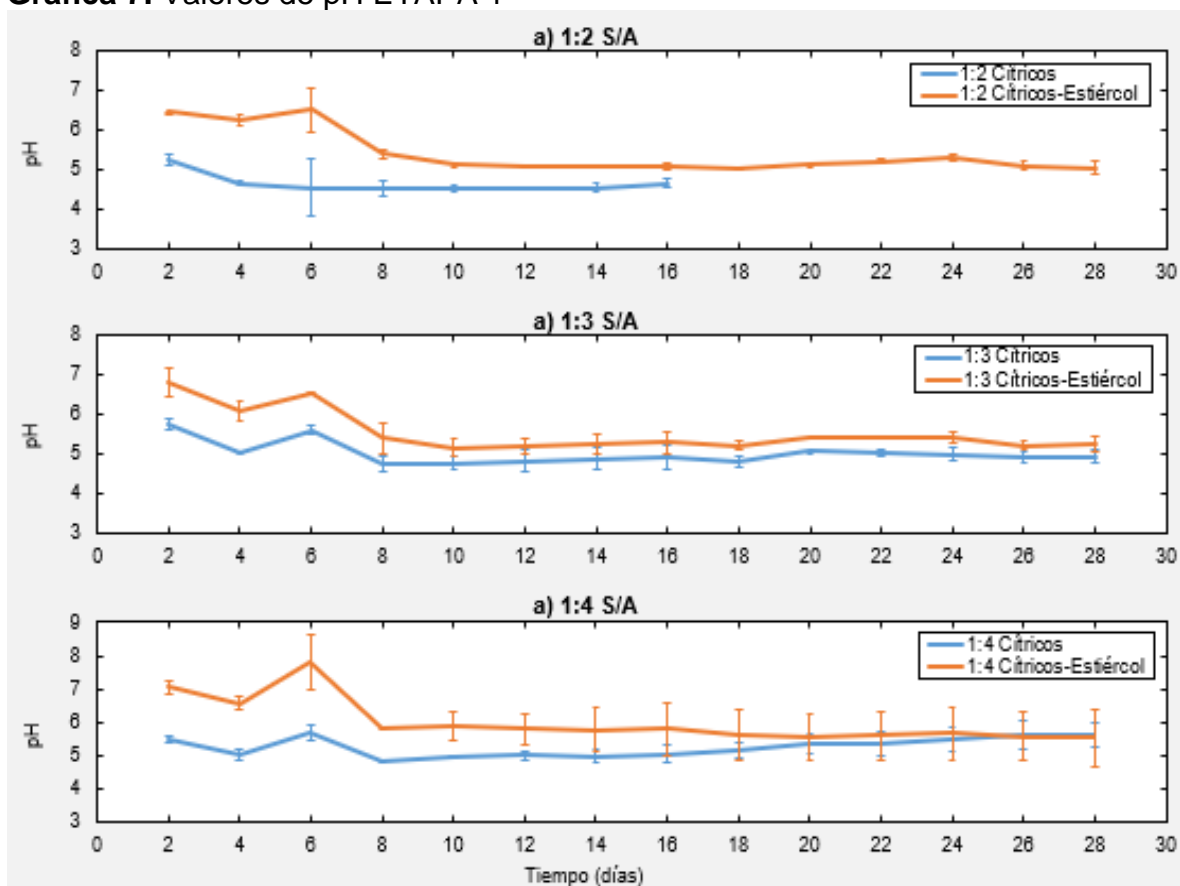


Fuente: elaboración propia

3.4.1.2 pH. Como se puede observar en el **ANEXO H** el pH de la mezcla dentro de cada uno de los montajes durante la ETAPA 1, se mantuvo a lo largo del tiempo dentro del rango de 7.2 – 4.52 para el experimento original y 8.39 - 4.04 para su respectiva réplica; los rangos de pH básicos (>7) se presentaron debido a la adición de la solución de bicarbonato sodio al 6% (**inciso 3.2.1.2 Dosis alcalinizante**), ya que en la ETAPA 1 se quería evaluar si era posible producir biogás sin la adición de un inóculo metanogénicamente activo. Se estableció para los 12 montajes experimentales en general, que el proceso digestivo se encuentra en las etapas de hidrólisis y acidogénesis debido al rango de valores de pH obtenidos en los montajes.

Se pudo determinar debido a la disminución del pH hasta valores ácidos (4.0-5.5) que el proceso metanogénico se inhibiría en la mayoría de los experimentos realizados, en particular en las mezclas que contienen únicamente residuos cítricos; por lo tanto, estas mezclas son descartadas para la ETAPA 2 de metanogénesis que es estrictamente dependiente del pH (el proceso metanogénico es factible en pH que se encuentren dentro del rango de 6-8). En los experimentos compuestos por residuos cítricos y estiércol bovino, la disminución del pH no es tan radical, sin embargo, también se inhibe el proceso metanogénico por la disminución del pH a lo largo del tiempo de duración de la ETAPA 1 (mezclas 1:2 y 1:3 con estiércol bovino), de tal manera que en la ETAPA 2 se deberá garantizar que la mezcla cuente con la capacidad tampón suficiente para soportar los cambios drásticos de pH. Los valores de pH promedio y la desviación estándar de cada punto a lo largo de la ETAPA 1 se pueden ver en la **gráfica 7**

Gráfica 7. Valores de pH ETAPA 1

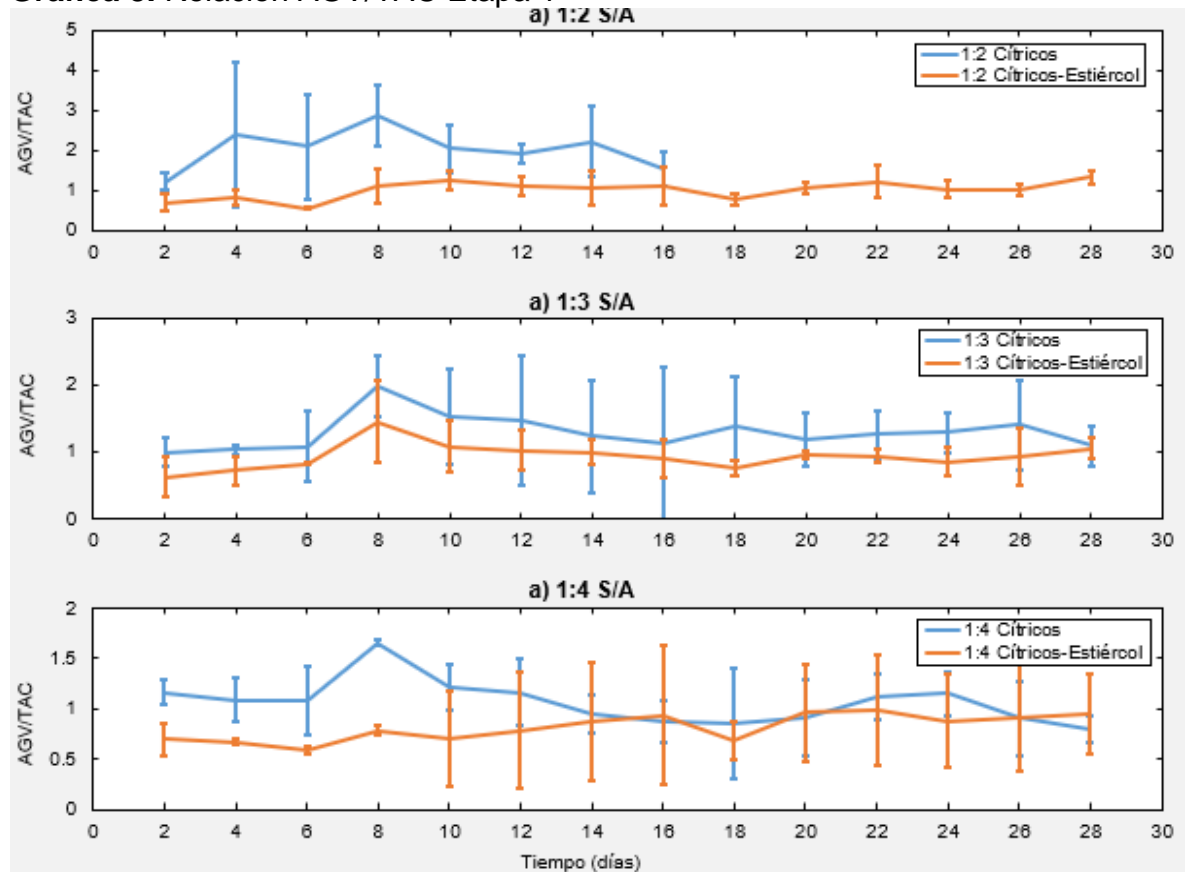


Fuente: elaboración propia

3.4.1.3 Ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (TAC). En el ANEXO H, se obtuvieron por titulometría los ácidos grasos volátiles y la alcalinidad y con estos valores se calculó la relación AGV/TAC para cada uno de los montajes experimentales; se pudo apreciar que está relación durante la ETAPA 1, se mantuvo

a lo largo del tiempo dentro del rango de 0.32 – 2.35 para el experimento 1 y 0.57-3.65 para el experimento 2. Se estableció para los 12 montajes experimentales en general que el proceso de digestión anaerobia se encuentra en las etapas de hidrólisis y acidogénesis debido a los elevados valores que se obtuvieron en las relaciones AGV/TAC en cada uno de los montajes, que implican la acumulación de ácidos grasos volátiles en el proceso de digestión anaerobia. Según Bote⁸⁶ “el valor adecuado para este parámetro deberá situarse por debajo de 0.25, valores de este cociente superiores a 0.8 indican que se ha producido una inhibición de la metanogénesis, valores por encima de 0.25 hasta 0.4 indican la existencia de problemas en el proceso y deberán tomarse medidas correctivas”. Los valores la relación AGV/TAC promedio y la desviación estándar de cada punto a lo largo de la ETAPA 1 se encuentran en la **gráfica 8**.

Gráfica 8. Relacion AGV/TAC Etapa 1



Fuente: elaboración propia

Se pudo establecer debido al aumento drástico de la relación AGV/TAC, que el proceso metanogénico se inhibiría en la mayoría de los experimentos realizados, en particular en las mezclas que contienen únicamente residuos cítricos; por lo tanto,

⁸⁶ BOTE. Op. Cit., p 49.

estas mezclas son descartadas para la ETAPA 2, tal y como se indicó en el inciso **3.4.1.2 pH** donde se especifica que el pH es estrictamente dependiente de la relación AGV/TAC en los valores anteriormente mencionados.

Adicionalmente de la inhibición de la reacción metanogénica generada por la acumulación de ácidos grasos volátiles (como se puede observar en la relación AGV/TAC), otra posible inhibición en la metanogénesis se puede generar debido a las características del sustrato utilizado, ya que los residuos cítricos contienen aceites esenciales como el D-limoneno que en concentraciones elevadas (<200 mg/kg residuo) pueden causar la muerte celular de las bacterias debido a su efecto antimicrobiano o pueden ser la fuente de alimento para que otras bacterias que se encuentren dentro de la mezcla generen productos que son inhibidores del proceso (*Geobacillus stearothermophilus* y *Escherichia coli* producen carveol, 2-terpineol, alcohol perilílico y pereil aldehído a partir del limoneno). Adicionalmente para el proceso de digestión anaerobia con cítricos no es recomendable realizar la trituración de los residuos, debido a que todo el aceite esencial contenido en las vesículas del cítrico se libera directamente en el medio y, por lo tanto, el efecto inhibitorio del mismo comienza inmediatamente⁸⁷.

En los experimentos que contienen residuos cítricos y estiércol bovino también se inhibe el proceso metanogénico por la elevada concentración de ácidos grasos volátiles a lo largo del tiempo de duración de la ETAPA 1 (mezclas 1:2, 1:3, 1:4 residuos cítricos-estiércol bovino), de tal manera que en la ETAPA 2 se deberá garantizar que el sustrato cuente con la capacidad tampón suficiente para que no se acumulen ácidos grasos volátiles durante el tiempo de retención o disminuir la proporción de mezcla compuesta por residuos cítricos-estiércol bovino que ingresa a la ETAPA 2 (**inciso 3.2.2.4 Mezclas finales Etapa 2**).

3.4.2 Etapa 2. Como se explicó en ítems anteriores, para esta etapa se emplearon las mezclas provenientes de los reactores compuestos por residuos cítricos y estiércol bovino y se inocularon con un lodo activo proveniente de un reactor metanogénico de la planta de tratamientos de agua residual de la empresa, con el fin de favorecer las condiciones apropiadas para la metanogénesis.

Durante esta etapa se midieron los siguientes parámetros:

3.4.2.1 Temperatura. Con el propósito de realizar el seguimiento de la temperatura, se establecieron tres puntos de seguimiento: Temperatura externa,

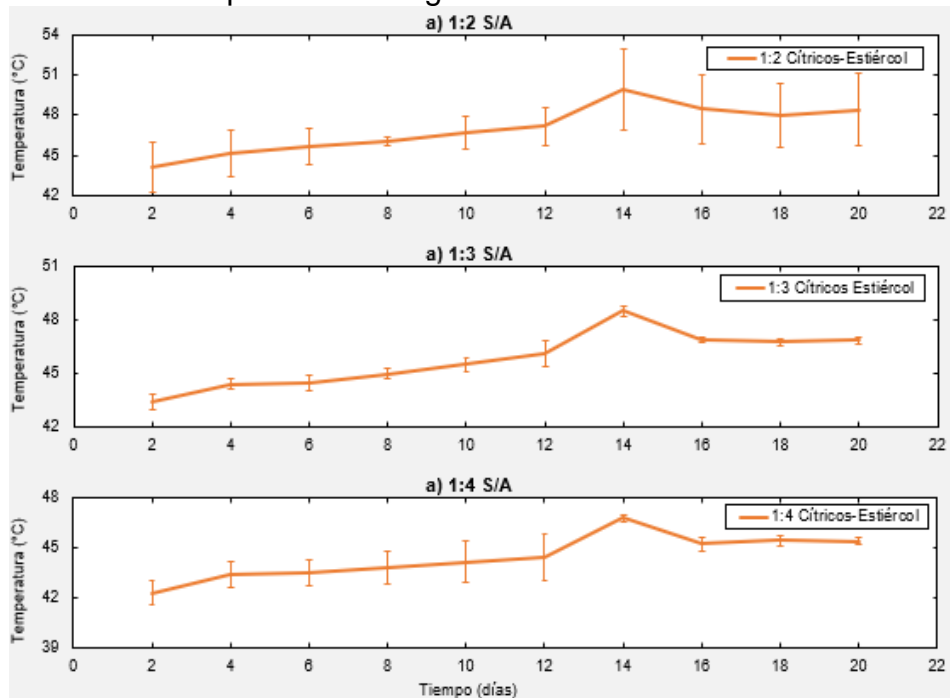
⁸⁷ RUIZ Begoña, FLOTATS, Xavier. Effect of limonene on batch anaerobic digestion of citrus peel waste. En: Biochemical Engineering Journal [En línea] 2016, vol.109, p.9-18. [Consultado: 28 de Junio de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369703X15301273>

temperatura interna en la fase gaseosa y temperatura interna en la fase líquida (mezcla).

➤ **Temperatura Externa.** Como se puede observar en el **ANEXO I** la temperatura externa de los montajes durante la ETAPA 2, se mantuvo a lo largo del tiempo dentro del rango de 37.5 y 37.9°C para todos los montajes experimentales. Esto implica que fue posible controlar la temperatura dentro del rango mesofílico establecido por el termostato.

➤ **Temperatura fase gaseosa.** Como se observa en la **Gráfica 9** la temperatura para los dos experimentos se mantuvo por encima de 40°C y alcanzó rangos mucho más altos que los obtenidos en la ETAPA 1. Se observó un aumento en la temperatura a medida que transcurría el tiempo de digestión, esto se puede considerar como consecuencia de la liberación de calor producida por las reacciones de acetogénesis y metanogénesis que ocurren dentro de los reactores, las cuales, como se expresó en la fundamentación teórica, poseen un ΔG con signo negativo implicando así que ocurren de forma espontánea y exotérmica.

Gráfica 9. Temperatura fase gaseosa ETAPA 2



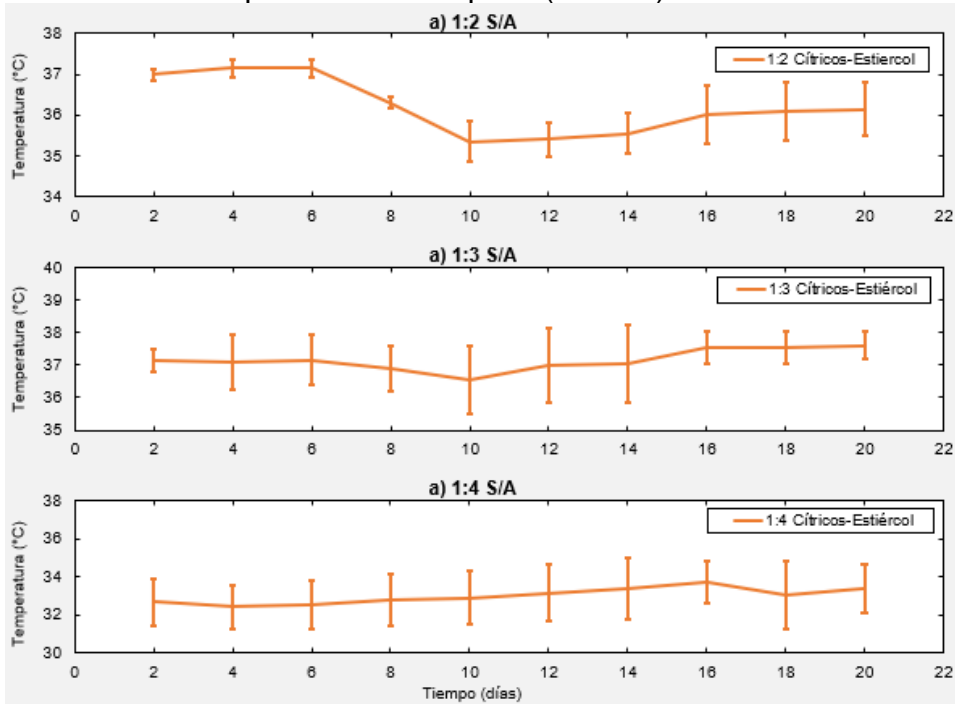
Fuente: elaboración propia

➤ **Temperatura fase líquida (Mezcla).** Como se puede observar en el **ANEXO I** la temperatura de las mezclas dentro de cada uno de los montajes durante la ETAPA 2, se mantuvo por encima de 30 °C para los dos experimentos; como se muestra en la **Gráfica 10** a pesar de que estas temperaturas fueron mayores a las de la ETAPA 1, se mantuvieron dentro del rango mesofílico y no sufrieron

variaciones extremas a lo largo del tiempo de retención que pudieran retrasar la cinética de los microorganismos anaerobios.

Como se mencionó anteriormente, las reacciones que ocurren en esta etapa son espontaneas, por lo cual se estableció que no fueron necesarias mayores temperaturas a las obtenidas, ya que la temperatura únicamente favorece la velocidad en que ocurre el crecimiento y metabolismo de las bacterias acetogénicas y metanogénicas, así como su supervivencia dentro del reactor.

Gráfica 10. Temperatura fase líquida (mezcla) ETAPA 2



Fuente: elaboración propia

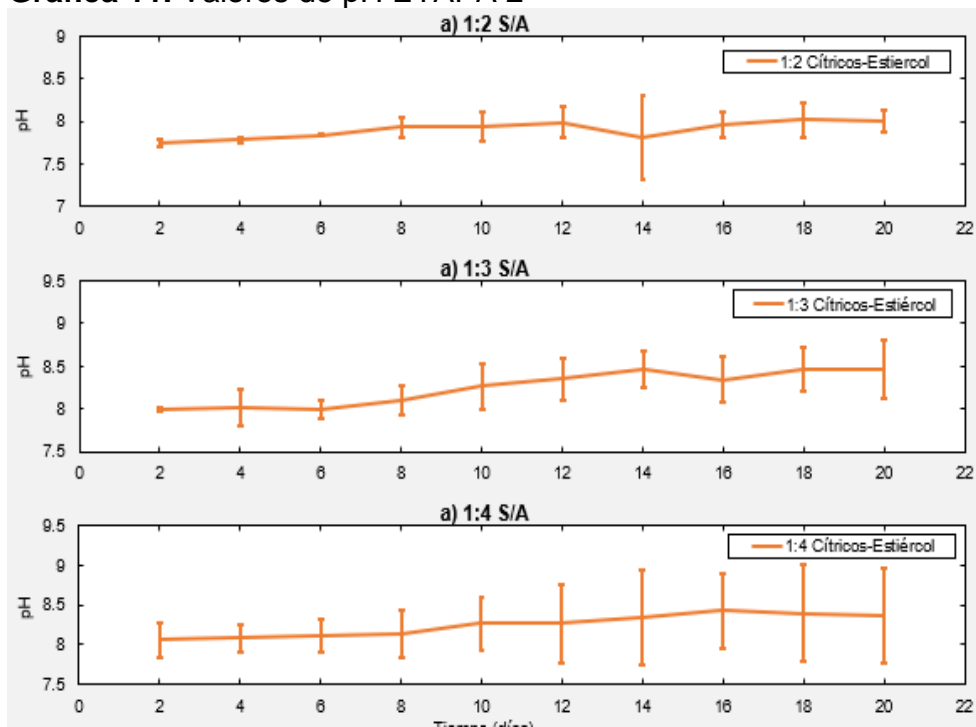
3.4.2.2 pH. Se determinó para los 6 montajes experimentales en general que el proceso de digestión anaerobia se encuentra en las etapas de acetogenesis y metanogenesis debido al rango de valores de pH obtenidos en cada uno los montajes individuales. Como se puede observar en el **ANEXO I** el pH del sustrato dentro de cada uno de los montajes durante la ETAPA 2, se mantuvo a lo largo del tiempo dentro del rango de 7.47– 7.91, 7.97-8.71, 8.21-8.82 para las relaciones 1:2,1:3 y 1:4 respectivamente en el experimento original y 7.76-8.16, 7.86-8.32, 7.91-8.09 para las relaciones 1:2,1:3 y 1:4 respectivamente en la réplica realizada. Como se mencionó anteriormente y de acuerdo con Varnero el rango óptimo para un reactor en donde se lleve a cabo únicamente la fase metanogénica, el pH del medio se debe encontrar dentro los rangos de 7.8 y 8.2⁸⁸; este rango de pH óptimo

⁸⁸ VARNERO, Op. cit., p. 43.

se mantuvo en 4 de los 6 experimentos realizados, siendo las proporciones 1:2 las que presentan mayor estabilidad. Dentro de los experimentos en los cuales el pH supera el rango óptimo, se presentó el aumento de pH después de 10 días de haberse iniciado el experimento, siendo la disminución de los ácidos grasos volátiles (AGV's) en la mezcla la principal causa para que se produjera este fenómeno. Los ácidos grasos que se encuentran presentes en el sustrato son la principal fuente de alimento de las bacterias metanogénicas del medio y una baja concentración de estos detendrá la etapa de metanogénesis.

En la ETAPA 2 se pudo garantizar que los 6 montajes experimentales contaran con la capacidad tampón suficiente para soportar los cambios drásticos de pH, de tal manera que el proceso digestivo no se inhibió por la disminución del pH (<6); sin embargo y como se explicó anteriormente el proceso se detuvo debido a la disminución de los ácidos grasos volátiles que conllevaron a un aumento del pH (>8.2) en algunos montajes experimentales y que se puede observar detalladamente al graficar el pH promedio para cada mezcla. Los valores de pH promedio y la desviación estándar de cada medida a lo largo de la ETAPA 2 se pueden ver en la **gráfica 11**.

Gráfica 11. Valores de pH ETAPA 2



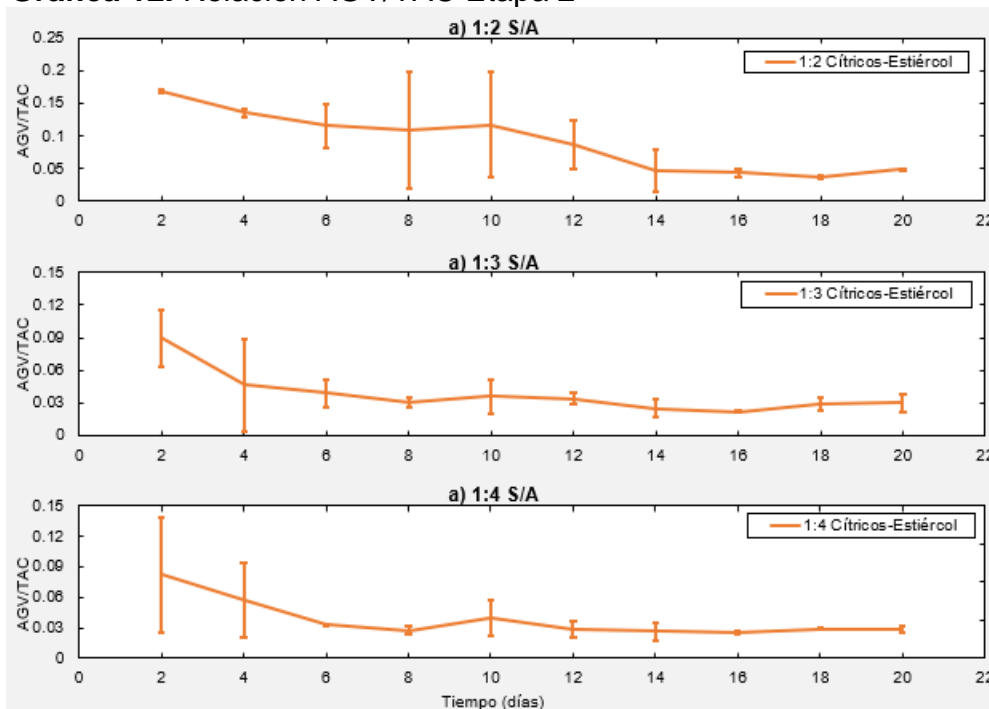
Fuente: elaboración propia

3.4.2.3 Ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (TAC). En el ANEXO I, se determinaron por titulometría los ácidos grasos volátiles y la alcalinidad y con estos valores se calculó la relación AGV/TAC para cada uno de los montajes

experimentales. Se determinó para los 6 montajes experimentales en general que el proceso digestivo se encuentra en las etapas de acetogénesis y metanogénesis debido a que los valores obtenidos en las relaciones AGV/TAC en cada uno de los montajes se encuentran dentro del rango óptimo establecido por Bote⁸⁹. Durante el tiempo en que fue realizada la ETAPA 2 se puede observar la disminución de la relación AGV/TAC en todos los montajes experimentales, lo que implica la disminución de los ácidos grasos volátiles dentro del proceso e indica que existe una correcta relación simbiótica entre microorganismos acidogénicos y metanogénicos al no presentarse acumulación excesiva de AGV's durante la ETAPA 2.

Como se puede ver a continuación en la **gráfica 12** desde el día catorce (14) de experimentación se presentó una disminución drástica de la concentración de ácidos grasos volátiles promedio, de tal manera que el proceso de digestivo se ve afectado en la producción de biogás; como se mencionó anteriormente los AGV's son compuestos intermediarios del proceso digestivo y al no contar con la cantidad requerida de estos compuestos, no se podrá continuar a la misma velocidad y cantidad de biogás generado a cómo se estaba realizando el proceso metanogénico anteriormente durante la ETAPA 2. Los resultados de la relación AGV/TAC promedio y la desviación estándar para cada punto para la ETAPA 2 se ven detalladamente en la **gráfica 12**.

Gráfica 12. Relacion AGV/TAC Etapa 2



Fuente: elaboración propia

⁸⁹ BOTE, Op. cit., p. 49.

Para evitar que la caída de ácidos grasos volátiles detenga el proceso de metanogénesis y con ello se disminuya la cantidad de biogás generado y el contenido del metano del mismo, se debe elevar la fuente de ácidos grasos volátiles dentro del experimento, el cual es la proporción de sustrato que se adiciona en la mezcla final que ingresa a la ETAPA 2 (residuos cítricos-estiércol bovino). Esto se debe realizar con el objetivo de garantizar la carga necesaria de compuestos intermediarios que necesita el medio para producir biogás (AGV's); sin embargo se debe tener cuidado al aumentar la proporción de sustrato ya que una alta proporción del mismo puede generar un aumento elevado de ácidos grasos volátiles y con ello una inhibición del proceso metanogénico debido a la disminución del pH, por lo cual para la elaboración de futuros trabajos y pruebas de potencial bioquímico de metano en donde se evalúen la digestión de residuos cítricos y estiércol bovino, se recomienda aumentar la proporción de residuos cítricos-estiércol que ingresa a la ETAPA 2 (**inciso 3.2.2.4 Mezclas finales Etapa 2**) y con ello aumentar la producción de biogás en el proceso digestivo.

3.4.3 Factibilidad del proceso de digestión anaerobia a partir de residuos cítricos. En la **Tabla 19** se puede observar el rendimiento máximo de metano de algunos tipos de sustratos vegetales (incluyendo a los sustratos evaluados en el presente trabajo de grado) de acuerdo al estudio realizado por Gunaseelan en donde: “se determinó el potencial bioquímico de metano de 54 muestras de desechos de frutas y vegetales y ocho muestras de biomasa estándar para comparar las extensiones y tasas de su conversión en metano”⁹⁰.

Tabla 19. Rendimiento máximo de metano de diversos sustratos vegetales

Sustrato	Rendimiento máximo de Metano (l/g*SV)	Sustrato	Rendimiento máximo de Metano (l/g*SV)
Cáscara de banano Var. Rashtali (<i>Musa paradisiaca L</i>)	0.321	Cáscara de chicozapote (<i>Achras sapota</i>)	0.244
Cáscara de mango Var. Mulgoa (<i>Mangifera indica L</i>)	0.523	Cáscara de piña (<i>Ananas sativus L</i>)	0.357
Cáscara de naranja (<i>Citrus sinensis</i>)	0.455	Cáscara de granada (<i>Punica granatum</i>)	0.312
Cáscara de limón (<i>Citrus limon</i>)	0.473	Cáscara de cebolla (<i>Allium cepa</i>)	0.4
Cáscara de mandarina (<i>Citrus reticulata</i>)	0.486	Cáscara de papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	0.267

Fuente: TRADUCIDO y MODIFICADO, GUNASEELAN, V. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. En: Biomass and Bioenergy 26 [En línea] India ,2003, p.389-399. [Consultado: 22 de Junio de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953403001545#:~:text=Introduction,to%20the%20atmosphere%20is%20zero.>

⁹⁰ GUNASEELAN, V. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. En: Biomass and Bioenergy 26 [En línea] India ,2003, p.389. [Consultado: 22 de Junio de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953403001545#:~:text=Introduction,to%20the%20atmosphere%20is%20zero.>

Como se puede ver en la **Tabla 19**, los residuos cítricos evaluados como sustrato en el presente trabajo de grado (limón, naranja, mandarina) presentan altos rendimientos de metano si son comparados con otros tipos de residuos, por lo cual esta clase de residuos son un buen material orgánico para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia obteniéndose cantidades superiores de biogás y metano producido. Una de las posibles razones del buen rendimiento de los residuos cítricos en los procesos anaeróbicos se debe a que son compuestos ricos en AGV's los cuales son el precursor principal de la reacción metanogénica. Lorenzo y Obaya afirman "que en general, mientras más complejo es el residual, más ácidos grasos volátiles (AGV) se producen y al final, el rendimiento de metano es mayor"⁹¹. Sin embargo, el proceso digestivo con residuos cítricos es complicado en su operación ya que se puede inhibir fácilmente por dos razones: la acumulación excesiva de AGV's que acidifican el medio de reacción y la presencia de compuestos inhibidores propios de la cáscara de residuo.

Si bien es importante contar una cantidad importante de AGV's para llevar a cabo al proceso digestivo, una acumulación excesiva de los mismos puede resultar tóxica para los microorganismos del medio, debido a la disminución que producen los AGV's en el pH. Por lo tanto, en la digestión anaerobia con residuos cítricos es primordial realizar la medición de los AGV's y alcalinidad; a su vez para garantizar que el proceso digestivo sea estable la concentración de los mismos en el medio se debe encontrar entre los 200 mg/l y 2000 mg/l de acuerdo a lo establecido por Bote⁹², con el fin de evitar la inhibición del proceso. También la división de etapas en el proceso digestivo (como se hizo en el presente trabajo de grado) permite controlar con mayor facilidad las condiciones necesarias para el crecimiento de los microorganismos productores en cada etapa y con ello evitar la acumulación de AGV's en el medio⁹³.

Por otra parte, la inhibición en la reacción metanogénica que se puede generar en el proceso debido los aceites esenciales característicos de los residuos cítricos (D-limoneno) y que son tóxicos para los microorganismos, ha sido un obstáculo importante para la conversión de estos residuos en biogás, por lo que se han desarrollado nuevos procesos para la utilización de residuos cítricos en donde parte del contenido de aceites esenciales del cítrico es eliminado antes de iniciar el proceso digestivo.

Tal es el caso del estudio Forgacs, Pourbafrani, Niklasson, Taherzadeh y Sárvári. en donde se aplicó un pretratamiento al residuo cítrico con explosión de vapor para mejorar el proceso digestivo, lo que resultó en una disminución de la concentración inicial de D-limoneno en un 94,3%. Posteriormente de realizar el pretratamiento se llevó a cabo el proceso anaeróbico mediante una codigestión de residuos cítricos y

⁹¹ LORENZO y OBAYA Op. Cit.; p 39.

⁹² BOTE Op. Cit.; p 9.

⁹³ RODRIGUEZ-PIMENTEL y HERNANDEZ-REYES, Op. Cit., p. 30

residuos sólidos previos, obteniéndose una producción de metano de $0.555 \pm 0.0159 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg/SV} \cdot \text{día}$ cuando los residuos cítricos fueron tratados, generándose mayor producción de metano que los residuos cítricos sin tratar⁹⁴.

En otro estudio realizado por Wikandari se propuso el pretratamiento de los residuos cítricos para eliminar el limoneno mediante lixiviación utilizando hexano como disolvente; después de haber eliminado el limoneno se observó que el hexano generaba un mayor efecto inhibitorio al proceso digestivo (menor producción de metano de residuos de cáscara de naranja pretratados) por lo cual también se debió eliminar este compuesto del residuo cítrico mediante evaporación. Con todos estos procedimientos anteriormente mencionados, realizados en una mezcla compuesta por cáscara de naranja picada y hexano en una proporción de 12:1, se obtuvo la mayor producción de biogás que correspondió a un aumento de más del triple de la producción de biogás de residuos cítricos sin tratar ($0,061$ a $0,217 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg/SV}$)⁹⁵.

3.5 CUANTIFICACIÓN DE BIOGAS Y METANO

A continuación, se presentan los resultados y los correspondientes análisis para cada uno de los parámetros medidos finalizadas las 2 etapas experimentales:

3.5.1 Método Volumétrico por desplazamiento de Agua. Se presentaron problemas con el montaje original del método volumétrico por desplazamiento de agua (conexión tubería PVC, recipiente plástico, bolsa cystoflo) para cuantificar la cantidad de biogás generado, debido a que la cantidad obtenida en cada montaje experimental de biogás no fue suficiente, a su vez no contó con la presión necesaria para superar la columna de agua destilada que se encontraba dentro del recipiente plástico/tanque de almacenamiento y desplazarla indicando la cantidad de gas producida, de tal manera que no se pudo cuantificar la producción de biogás diaria mediante este montaje experimental.

Con el fin de medir el volumen de gas generado en la fase metanogénica, se realizó una adaptación de menor tamaño basado en el método volumétrico de desplazamiento de agua mediante probeta invertida en 3 de los 6 experimentos de la ETAPA 2, dicho montaje se puede observar en la **Ilustración 23**. Se pudo evidenciar el mismo problema del montaje original, ya que el biogás producido no

⁹⁴ FORGACS, Gergely; POURBAFRANI, Mohammad; NIKLASSON, Claes; TAHERZADEHA, Mohammad J y SÁRVÁRI, Ilona. Methane production from citrus wastes: process development and cost estimation . En: J Chem Technol Biotechnol 87 [En línea] ,2012, p.250-255. [Consultado: 22 de Junio de 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/1020896/Methane_production_from_citrus_wastes_process_development_and_cost_estimation

⁹⁵ WIKANDARI, Rachma. Improvement of Biogas Production from Orange Peel Waste by Leaching of Limonene. [En línea] ,2015, p.1-6. [Consultado: 25 de Junio de 2020]. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/bmri/2015/494182/>

tuvo la presión necesaria para superar la columna del líquido de la probeta y por lo tanto no fue posible cuantificar la producción diaria de gas generado, esto es un indicativo claro de que la cantidad de biogás generada es baja en base a la mezcla final de la ETAPA 2 y por lo tanto se deberá aumentar la proporción del sustrato e inóculo en el reactor para futuros ensayos de digestión anaerobia.

Ilustración 23. Metodo Volumetrico mediante probeta invertida



Fuente: elaboración Propia

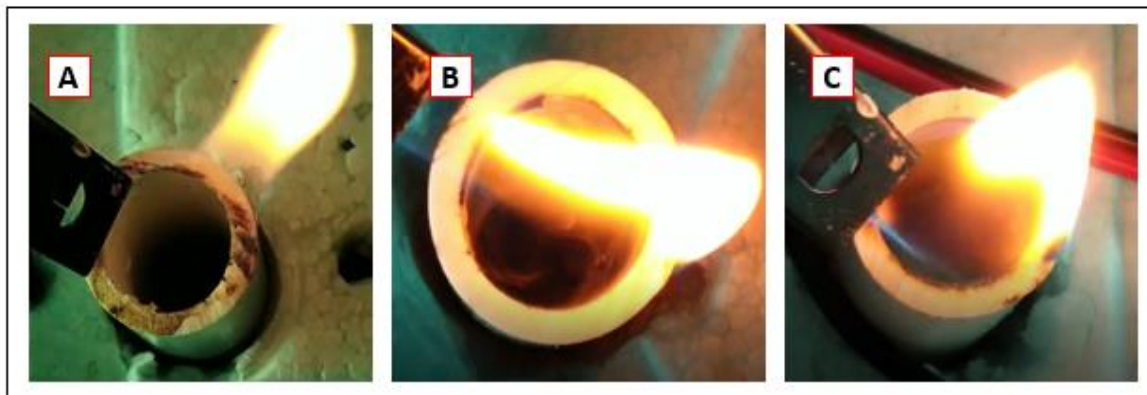
Al no poderse medir la cantidad diaria de biogás producido, no se pudo realizar la cinética de los 6 montajes experimentales en la ETAPA 2 y con ello identificar el experimento con mayor producción de biogás experimental, ni el periodo de adaptación de los microorganismos a las mezclas ingresadas.

3.5.2 Prueba de inflamabilidad. Terminado el tiempo de retención de la ETAPA 2 (20 días) se realizó la prueba de inflamabilidad, la cual consistió en acercar un encendedor de chispa a la tubería de PVC que se encuentra conectada al reactor para evaluar el biogás producido en cada uno de los montajes experimentales mediante el color de llama que se produce, como se mencionó anteriormente y de acuerdo a Varnero⁹⁶ “cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable” por lo cual, esta prueba representa un estimativo de la composición del gas obtenido; a su vez el mismo autor, especifica que la llama debe ser “azulada y de buena consistencia”⁹⁷. A continuación, en la **Ilustración 24** se puede observar el registro fotográfico de la prueba de inflamabilidad finalizada la ETAPA 2 para el experimento 1, en esta ilustración las letras A, B y C representan las relaciones 1:2, 1:3 y 1:4 respectivamente.

⁹⁶ VARNERO, Op. cit., p. 16.

⁹⁷ *Ibíd.*, p. 112

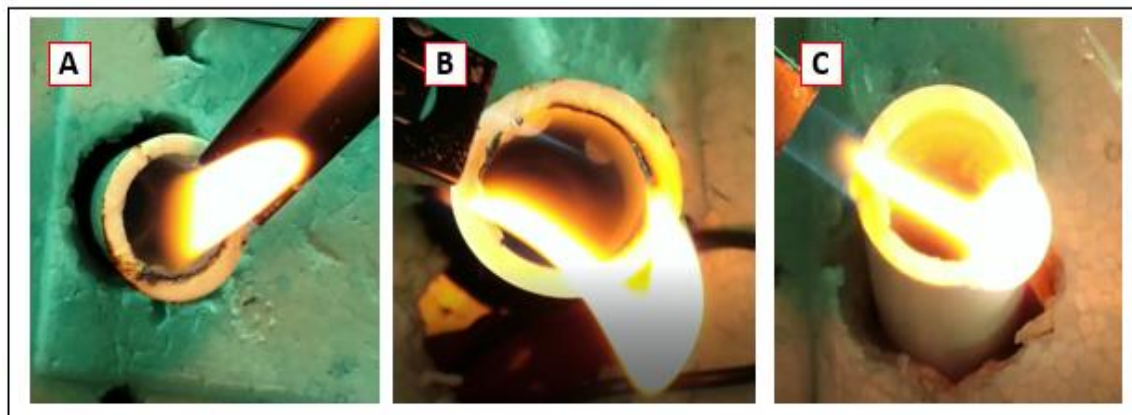
Ilustración 24. Prueba de inflamabilidad Experimento 1



Fuente: elaboración propia

En la **Ilustración 25** se puede observar el registro fotográfico de la prueba de inflamabilidad finalizada la ETAPA 2 para el experimento 1, en esta ilustración las letras A, B y C representan las relaciones 1:2, 1:3 y 1:4 respectivamente.

Ilustración 25. Prueba de inflamabilidad Experimento 2



Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en ambas pruebas de inflamabilidad para ambos experimentos se presentan llamas de color amarillo constantes, lo que representa una combustión incompleta en el proceso, esto implica que el biogás generado dentro de los 6 montajes experimentales tiene un bajo contenido de metano y por ende un bajo poder calorífico, por lo que no podrá ser utilizado como fuente de calor, vapor o generador de electricidad.

3.5.3 Método Volumétrico para la determinación de la composición de metano en el biogás. En el **ANEXO J**, se encuentran los volúmenes desplazados de agua para cada uno de los montajes experimentales de la ETAPA 2; se triplicó esta prueba para observar la variabilidad de los resultados experimentales. A partir

de los volúmenes obtenidos se calculó el volumen promedio de agua desplazada y la desviación estándar del experimento, con ello se obtuvo el porcentaje de metano promedio y la variación del contenido de metano en el mismo, los resultados se encuentran registrados en la **Tabla 20**.

Tabla 20. Porcentaje de Metano en el biogás ETAPA 2

EXPERIMENTO ORIGINAL		EXPERIMENTO RÉPLICA	
Prueba	% Metano	Prueba	% Metano
1:2 Inoculo	15.3 ± 3.4%	1:2 Inoculo	17.5 ± 0.8%
1:3 Inoculo	11.4 ± 5.3%	1:3 Inoculo	16.4 ± 1.7%
1:4 Inoculo	14.2 ± 0.8%	1:4 Inoculo	15.6 ± 2.1%

Fuente: elaboración propia

Reafirmando la prueba de inflamabilidad anteriormente descrita, el biogás generado en cada uno de los 6 montajes experimentales contiene un bajo contenido de metano, sin embargo, se necesitan de métodos de cuantificación más rigurosos tales como una cromatografía de gases o un análisis de metano para contrastar los resultados obtenidos con el método volumétrico. No obstante, las 2 pruebas realizadas (inflamabilidad y desplazamiento volumétrico) son un indicador importante para establecer que el gas generado bajo las proporciones indicadas cuenta con un bajo poder calorífico, por lo que no podrá ser utilizado como una fuente de calor, vapor o generador de electricidad, las principales causas del bajo contenido de metano en los montajes experimentales fueron explicadas en el inciso **3.4.2.3 Ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (TAC)**.

3.5.4 Evaluación teórica del contenido de metano. Como se explicó en la metodología del presente trabajo, el contenido de metano teórico se calculó a partir de los parámetros de composición elemental (**Tabla 21**) y los coeficientes de la ecuación de Buswell, los fueron calculados en el **ANEXO K**.

Tabla 21. Composición elemental de residuos orgánicos

Elemento	Composición en peso			
	Excreta %	Mandaría %	Limón %	Naranja%
C	0,4065	0,4916	0,4823	0,5016
H	0,0551	0,0596	0,0596	0,0595
O	0,2884	0,4424	0,4501	0,4347
N	0,0172	0,0037	0,0059	0,0026
Otros	0,2327	0,0026	0,0019	0,0013

Fuente: elaboración propia a partir de bibliografía.

Por medio del modelo se calcularon los potenciales teóricos de producción de biogás y de metano, así como su relación y su representación por demanda química de oxígeno (DQO), dichos resultados son expresados en la **Tabla 22**.

Tabla 22. Resultados potencial de producción de biogás y metano.

Biogás (m³/kg)	0,9562
Metano (m³/kg)	0,5124
PCH₄ (m³ Metano/m³ Biogás)	0,5358
Biogás (m³/kgDQO)	0,6531

Fuente: elaboración propia

Finalmente se multiplicó el potencial de metano por la cantidad en kg de carga orgánica empleada en cada una de las relaciones y se obtuvieron los resultados expresados en la **Tabla 23**.

Tabla 23. Metano teórico

Relación	Cantidad de metano teórica (m³)
R 1:2	0,5637
R 1:3	0,4227
R 1:4	0,3382

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la **Tabla 23** a partir de los resultados teóricos obtenidos, se determinó que la relación 1:2 p/p (estiércol + residuos cítricos: agua) es la proporción de residuos que cuenta con la mayor producción de metano teórica dentro del proceso, ya que es la mezcla que cuenta con mayor carga de sólidos totales, sólidos volátiles y carga orgánica (DQO) del experimento, sin embargo el método teórico no estima la biodegradabilidad del sustrato o si se produce algún efecto inhibitorio en el proceso de digestión anaerobia.

De acuerdo con el parámetro **PCH₄** de la **Tabla 22** calculado mediante la ecuación de Buswell, todas las relaciones evaluadas (1:2,1:3,1:4) bajo las proporciones de mezcla anteriormente mencionadas, contarán con un porcentaje de metano teórico (CH₄) del 53,6% y de dióxido de carbono (CO₂) del 46.4%. Este resultado representa la factibilidad teórica para obtener biogás a partir de los residuos cítricos de la empresa de alimentos en la proporción establecida, ya que al superar el contenido de metano del 45% se garantiza que el biogás sea inflamable y tenga un buen poder calorífico siendo útil como fuente calor, vapor o generador de electricidad.

El potencial bioquímico de metano teórico es superior a los resultados que se pueden obtener experimentalmente ya que se idealiza completamente el proceso de digestión anaerobia partiendo desde el concepto de gases ideales, adicionalmente se asume que hay una transformación completa del sustrato en los compuestos de interés (CH_4 y CO_2), se desconsidera la formación de biomasa que reduce la eficiencia del proceso en un 10%⁹⁸ y no se tienen en cuenta los efectos de la inhibición del proceso debido al pH y a la acumulación excesiva de ácidos grasos volátiles; los parámetros anteriormente mencionados disminuyen el rendimiento de la prueba de potencial bioquímico de metano y por lo tanto la producción de biogás experimental.

⁹⁸ ARESTA, DIBENEDETTO y DUMEIGNL, Op. cit., p. 408

4. CONCLUSIONES

Con base a la matriz de selección ponderada, se obtuvo que una composición de 40% cáscara de limón, 35% cáscara de mandarina y 25% cáscara de naranja en la mezcla de residuos cítricos es la más adecuada para la digestión anaeróbica con relación a su rendimiento, disponibilidad, pretratamientos, características fisicoquímicas y macro y micronutrientes presentes en el sustrato a ser digerido. Así mismo, es necesaria la adición de diferentes componentes tales como excreta animal (cosustrato), soluciones minerales y reductoras, los cuales aporten estabilidad y micronutrientes al medio, evitando así, la inhibición temprana de los microorganismos encargados de metabolizar el sustrato.

Se determinó que la realización de pretratamientos tales como la reducción de partícula y la adición de soluciones alcalinizantes a las cáscaras de fruta, mejoran significativamente la calidad de sustrato, evitando la acidificación del medio y por lo tanto la inhibición del sistema, sin embargo, se debe abarcar estudios más robustos con el fin de lograr un mejor entendimiento del efecto de los tipos de pretratamientos del sustrato sobre la producción de metano.

Se estableció que la digestión anaerobia es un proceso exigente en cuanto a las condiciones de operación en cada una de sus fases, por lo cual, se debe garantizar control de temperatura en rangos mesofílicos a termofílicos, completo aislamiento térmico y anaerobio, valores de pH cercanos a la neutralidad y acidez baja en todo el sistema; teniendo en cuenta las diferentes reacciones que ocurren dentro del reactor, mantener dichas condiciones a lo largo del tiempo de retención es de alta dificultad, por lo tanto, la digestión anaerobia en dos etapas presenta una ventaja a la hora de controlar y satisfacer dichos requisitos mediante el establecimiento de medidas variantes entre cada etapa.

De acuerdo a la revisión bibliográfica los residuos cítricos evaluados como sustrato en el presente trabajo de grado (limón, naranja, mandarina) presentan altos rendimientos de metano si son comparados con otros tipos de residuos, debido a que son residuos ricos en AGV's, por lo cual esta clase de residuos son buenos materiales orgánicos para realizar el proceso de digestión anaerobia obteniéndose cantidades superiores de biogás y metano producido. Sin embargo y como se comprobó experimentalmente, el proceso digestivo con residuos cítricos es complicado en su operación ya que se puede inhibir fácilmente por la acumulación excesiva de AGV's en el medio y la presencia de compuestos inhibidores propios de la cáscara del residuo.

Con base a los parámetros in-situ medidos durante el tiempo de reacción para cada uno de los montajes experimentales (pH, AGV/TAC), se determinaron que las muestras que presentaron mayor estabilidad en el proceso de digestión anaerobia en la ETAPA 2 fueron las relaciones 1:2 p/p en ambos experimentos. Bajo esta proporción también se evidenció la disminución de los ácidos grasos volátiles (AGV's) durante la etapa metanogénica, pero su pH se mantuvo dentro del rango óptimo de reacción, a diferencia de las proporciones 1:3 y 1:4 donde se presentó un aumento significativo del pH en algunos de los montajes experimentales.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de desplazamiento volumétrico de agua, prueba de inflamabilidad y el método volumétrico para la determinación de la composición de metano, se generaron pequeñas cantidades de biogás con bajas composiciones de metano en todos los montajes experimentales realizados. El rendimiento del proceso digestivo se vio afectado debido a la dilución de las mezclas finales que ingresaron a la ETAPA 2, ya que las bacterias metanogénicas contaron con una baja proporción de materia orgánica para degradar (sustrato); de tal manera que el proceso metanogénico se detuvo al cabo de 14 días por la disminución de ácidos grasos volátiles en el medio

Se calculó el potencial bioquímico de metano teórico para cada una de las relaciones establecidas en la ETAPA 2 mediante la ecuación de Buswell, bajo este modelo se obtuvo que la relación 1:2 p/p (estiércol + residuos cítricos: agua) es la proporción de residuos con mayor producción de metano dentro del proceso; sin embargo este modelo teórico no estima la biodegradabilidad del sustrato, ni la inhibición del proceso debido a la disminución del pH o a la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV's); a su vez es una representación idealizada del proceso digestivo, por lo tanto puede diferir frente a los resultados experimentales.

5. RECOMENDACIONES

Se recomienda estudiar el efecto de la agitación sobre la producción de metano, así como el tipo de agitación (Mecánica o Automática) y la velocidad a la cual se debe realizar, con el fin de aumentar el contacto de los microorganismos con el sustrato y evitar que se generen espumas en la superficie del medio, pero sin llegar a inhibir su crecimiento y latencia dentro del sistema digestivo.

Evaluar la aplicación de pretratamientos a la materia prima, más allá de la disminución del tamaño de partícula tales como tamizado, secado y separación de aceites esenciales de los residuos cítricos (en especial el limoneno por su efecto inhibitorio del proceso metanogénico a altas concentraciones), con el fin de garantizar las condiciones adecuadas para las bacterias metanogénicas, así como establecer su efecto sobre la composición del biogás obtenido.

Aumentar la proporción de sustrato e inóculo en la etapa de metanogénesis (ETAPA 2) para evitar la disminución de los ácidos grasos volátiles durante el tiempo de duración del desarrollo experimental, esto con el fin de aumentar la cantidad de biogás producido y el contenido de metano del mismo; a su vez proporcionar al medio sintético de la ETAPA 2 una solución completa de macro, micronutrientes y vitaminas para evitar la inhibición del proceso debido a la ausencia de alguno de estos componentes.

Si se llega a realizar el método de desplazamiento volumétrico de agua para cuantificar el biogás, se recomienda reducir el tamaño de ese montaje experimental, ya que si se está empleando un reactor o varios reactores a escala laboratorio las cantidades de biogás producido serán pequeñas, a su vez se recomienda simplificar este montaje utilizando arreglos a nivel laboratorio tales como probeta invertida o trampa de NaOH invertida.

Para garantizar que la prueba de potencial bioquímico de metano (proceso de digestión anaerobia) del sustrato evaluado sea robusta, se recomienda desarrollar un mínimo de 3 montajes experimentales o replicas para cada uno de los niveles del diseño de experimentos; adicionalmente se reducen gastos en los montajes experimentales disminuyendo el tamaño del reactor (utilizar botellas serológicas, frascos Schott inferiores a 1L) y conectando cada uno de los elementos del montaje experimental con mangueras transparente plastificada, junto con los arreglos de desplazamiento volumétrico a escala laboratorio mencionados anteriormente.

Para la medición de parámetros in situ como pH, AGV's TAC y DQO realizar la medición periódica de estos parámetros en un mayor intervalo de tiempo cuando el medio se estabilice y sin retirar muestras del reactor en donde se realice el método de cuantificación de biogás; para ello se recomienda disminuir el tamaño del reactor principal (experimento en donde se cuantifica el biogás) y realizar ensayos o muestras más pequeñas con las mismas mezclas a evaluar, que se irán descartando a medida que se analicen los parámetros durante cada uno de los intervalos de tiempo establecidos por el experimentador.

Se recomienda utilizar un método más riguroso para la cuantificación de metano, como la cromatografía de gases la cual no fue realizada debido a la situación de los laboratorios al momento de desarrollar la fase experimental y por temas de costos. Esta técnica permitirá obtener resultados más exactos y robustos en cuanto al contenido de metano y los demás componentes que contienen las muestras de biogás obtenido.

BIBLIOGRAFÍA

ANGELIDAKI, Irini; SANDERS, Wendy. Assessment of the anaerobic biodegradability of macro pollutants. En: Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 3 [En línea] Netherlands,2004, p.122. [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/225249844_Assessment_of_the_anaerobic_biodegradability_of_macropollutants

ANGULO, Julián; LOZANO, Luisa; GONZALEZ, Ángel; SANCHEZ, Eduardo Y OJEDA, Karina. Monitoring anaerobic digester parameters of biogas production from corn (*Zea mays*) leaf and stalk residual biomass. En: Contemporary Engineering Sciences. [En línea] Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Cartagena: Cartagena, Colombia. 2018. vol.11, nro. 26 p. 1291-1299 (1297) [Consultado 21, Marzo 2020] Disponible en: <https://doi.org/10.12988/ces.2018.8389>

ARESTA, Michele; DIBENEDETTO, Angela y DUMEIGNIL Franck. Biorefinery - From Biomass to Chemicals and Fuels - 18.1 Laboratory-Scale Biomethane Potential Tests. [En línea] De Gruyter, 2012. [Consultado el 15 de Julio de 2020]] Disponible en <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U4G1Z2/biorefinery-from-biomass/laboratory-scale-biomethane-ISBN-978-3-11-026028-1>

ASOHOFrucOL. BALANCE DEL SECTOR HORTIFRUTÍCOLA EN 2019. [En línea]. MINCIT, Colombia. 2019. [Consultado: 13, Agosto, 2020]. Disponible en: <http://www.asohofrucol.com.co/interna.php?cat=3&scat=45&act=1>

ASOHOFrucOL. Comportamiento del Mercado Nacional e Internacional de Cítricos Frescos. [Presentación en línea]. MINCIT, Colombia. 2018. [Consultado: 13, Agosto, 2020]. Disponible en: http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/CongresoInternacionalCitricola/Comportamiento_Mercado_Nacional_Internacional_c%C3%ADtricos_frescos.pdf

ARBOLEDA, Yeison y GONZÁLEZ, Luis. Fundamentos para el diseño de biodigestores [en línea]. Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas. Universidad nacional de Colombia sede Palmira, facultad de ingeniería y administración, Palmira.: 2012. p. 18. [Consultado 28 de marzo de 2020] Disponible en <http://bdigital.unal.edu.co/7967/>

BIOGÁS DOÑA JUANA. Descripción General [Sitio Web]. Bogotá. [Consultado 19, Septiembre, 2019]. Disponible en: <http://biogas.com.co/>

BOTE, Pedro. Estudio de los efectos del pH extremo por adición de NaOH sobre la producción y calidad del biogás y otros parámetros de la digestión anaerobia. [En línea]. Trabajo fin de Master en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua. Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales. Alicante, España: 2013. p. 9

[Consultado 28, Junio 2020] Disponible en: <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm-2013-pedro-bote.pdf>

CAMACHO Ricardo; VILLADA, Héctor S. y HOYOS, José L. Evaluación del Estiércol de Vaca como Inóculo en la Digestión Anaerobia Termófila de Residuos Sólidos Urbanos. En: Información Tecnológica [En línea]. Popayán, Colombia: Universidad del Cauca, 2017, vol.28, nro.3, p 29-36. [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000300004> ISSN: 0718-0764

CARDENAS-CLEVES, Lina Marcela; PARRA-OROBIO, Brayan Alexis; TORRES-LOZADA, Patricia y VASQUEZ-FRANCO, Carlos Humberto. Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. En: Revista ION [En línea]. Cali, Colombia: Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle, 2016, vol.29, nro.1 p.95-108 [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2016000100009&lng=en&nrm=iso ISSN: 0120-100X. DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>

CCA. Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte [En línea]. Informe Sintético. Comisión para la Cooperación Ambiental. Montreal: 2017. p.6 [Consultado 11, marzo, 2020]. Disponible en: <http://www3.cec.org/islandora/en/item/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf> ISBN: 978-2-89700-232-9

CENDALES-LADINO, Edwin Darío. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. En: Bdigital [En línea]. Bogotá, Colombia: Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, 2011, p.57-59 [Consultado: 28 de Junio de 2020]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/4100/>

DE LEMOS, Carlos. Anaerobic Reactors. Department of Sanitary and Environmental Engineering, Federal University of Minas Gerais. Brasil: IWA Publishing, 2007. p.7-8 vol.4. [Consultado: 27 de Marzo de 2020]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U9YI64/anaerobic-reactors-volume/microbiology-anaerobic> ISBN: 978-1-68015-587-7

DÍAZ-BAÉZ, María; ESPITIA, Sandra y MOLINA, Francisco. Digestión Anaerobia: una aproximación a la tecnología [En línea]. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia, 2002. p.96. [Consultado: 14 de Marzo de 2020]. Disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/43178/2/9587011961_Parte%201.pdf ISBN: 958-701-196-1

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos. [En línea]. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Bogotá D.C. 2018. p.6 [Consultado 19, Septiembre, 2019]. Disponible en: [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2. disposicion final de residuos solidos - informe 2017.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2._disposicion_final_de_residuos_solidos_-_informe_2017.pdf)

FORGACS, Gergely; POURBAFRANI, Mohammad; NIKLASSON, Claes; TAHERZADEHA, Mohammad J y SÁRVÁRI, Ilona. Methane production from citrus wastes: process development and cost estimation. En: J Chem Technol Biotechnol 87 [En línea] 2012, p.250-255. [Consultado: 22 de Junio de 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/1020896/Methane_production_from_citrus_wastes_process_development_and_cost_estimation

GIRALDO, Yesica y ORTIZ, María. Producción de Biogás a partir de la codigestión de Biomasa Residual en un sistema de digestión anaerobia con agitación a escala laboratorio [en línea]. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Fundación Universidad de América, Facultad de ingenierías, Departamento de Ingeniería Química. Bogotá D.C.: 2018. p. 44. [Consultado 3, marzo, 2020]. Disponible en Repositorio Educativo Digital Lumieres: <http://hdl.handle.net/20.500.11839/6933>

GOMEZ, Juan y GARCIA, Angie. Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia [en línea]. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Fundación Universidad de América, Facultad de ingenierías, Departamento de Ingeniería Química, Bogotá D.C.: 2016. p. 18. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en Repositorio Educativo Digital Lumieres: <http://hdl.handle.net/20.500.11839/667>

GUNASEELAN, V. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. En: Biomass and Bioenergy 26 [En línea] India ,2003, p.389-399. [Consultado: 22 de Junio de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953403001545#:~:text=Introuduction,to%20the%20atmosphere%20is%20zero.>

Informe mensual de residuos: Junio. Indicador Clave (KPI). [Excel]. Junio 2019 [Corporación Anónima]

INSTITUTO COLOMBIANO DE BIENESTAR FAMILIAR. Tabla composición Alimentos Colombianos [En línea]. Colombia: ICBF, 2018 p. 56-61 [Consultado: 5 de Marzo de 2020]. Disponible en: https://www.icbf.gov.co/sites/default/files/tcac_web.pdf. ISBN 978-958-623-199-2

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Sólidos Totales Secados a 103-105°C. TP0436 [en línea]. Bogotá D.C: IDEAM. 2007. p.2. [Consultado: día 28 de Marzo de 2020]. Disponible en:

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Totales+secado+a+103+-+105%C2%BAC..pdf/d4faab4a-34e4-4159-bf4c-50353b101935>

_____. Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría. TP0086 V5 [en línea]. Bogotá D.C: IDEAM. 2007. p.2. [Consultado: día 28 de Marzo de 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+d e+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673

KARAPAJU, P.L.N y RINTALA, Jukka. Thermophilic Anaerobic Digestion for Industrial Orange Waste [En línea]. En: Environmental Technology [En línea]. 2006, vol.27, nro.6 p.623-633 [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/6920177_Thermophilic_Anaerobic_Digestion_of_Industrial_Orange_Waste DOI: 10.1080/09593332708618676

LORENZO, Yaniris. y Obaya, Ma.Cristina. La digestión anaerobia y los reactores UASB Generalidades. En: ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar [En línea]. Ciudad de la Habana, Cuba: 2006. vol. XL, p. 13-21. [Consultado 12 de Marzo 2020] Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223121549002.pdf>. ISSN: 0138-6204

LUQUE, Rafael; KI LIN, Carol; WILSON, Karen y CLARK, James. Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies. [En línea]. Segunda Edición. Reino Unido y Estados Unidos. Woodhead Publishing, 2016 p.260-261 DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04240-2> ISBN: 978-0-08-100456-2

MANCILLAS-SALAS, Sergio; RODRÍGUEZ-DE LA GARZA, José; RÍOS-GONZÁLEZ, Leopoldo. Bioestimulación de la Digestión Anaerobia. En: Acta Química Mexicana [En línea]. Depto. de Biotecnología. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Coahuila: Coahuila, México. 2012. Vol. 4, nro. 8 p. 3 [Consultado 21, Marzo 2020] Disponible en: <https://docplayer.es/7080828-Bioestimulacion-de-la-digestion-anaerobia.html>

MARTINEZ, Alejandro. Aceites esenciales. [En línea]. Universidad de Antioquia, Medellín, 2003. p. 1 [Consultado 10 de Junio 2020] Disponible en: http://www.med-informatica.com/OBSERVAMED/Descripciones/AceitesEsencialesUdeA_esencias_2001b.pdf

MILQUEZ, Harvey. Digestión anaerobia en dos fases de los residuos de cebolla blanca (*Allium cepa*) y desarrollo de un modelo lineal adaptativo predictivo [En línea]. Tesis de Doctorado en Ciencias en Energía Renovable. Centro de

Investigación Científica de Yucatán, Mérida, Yucatán. México: 2017. p. 62-64. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en Repositorio CICY: https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/458/1/PCER_D_Tesis_2017_Milquez_Harvey.pdf

MOSOS, Andrés; CADAVID, Luz. y AGUDELO, Ana. Potencial de biogás de residuos de frutas y verduras provenientes de restaurantes de Palmira. En: Acta Agronómica [En línea]. Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2012, vol.61, nro.5, p 97-98. [Consultado: 3 de Marzo de 2020]. Disponible en: https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/41478/43087 ISSN. 2323-0118

ORTEGON, María. Evaluación del potencial acidogénico para producción de ácidos grasos volátiles (AGV) a partir de lixiviados de los residuos sólidos orgánicos, como plataforma de biorefinería-. En: CRAI USTA [En línea] Colombia: Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Santo Tomas, 2016, ANEXO I. [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2471/2016mariaortegon1.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

PARRA, Ricardo. Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. En: Producción + Limpia [En línea]. Lugar de publicación: Boyacá, Colombia. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia., 2015, vol.(10), nro.(2), p. 142-159. [Consultado: 27 de Marzo de 2020]. DOI sino tiene DOI coloque Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014&lng=en&nrm=iso ISSN: 1909-0455

PÉREZ, Andrea; TORRES, Patricia. Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. En: Ingeniería y Competitividad [En línea] Cali, Colombia: Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle, 2008, vol. 10, nro 2, p. 41-52. [Consultado: 28 de Junio de 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2913/291323482002.pdf> ISSN: 0123-3033

RIVAS-SOLANO, Olga; FAITH-VARGAS, Margie; GUILLÉN-WATSON, Rossy. Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. En: Revista Tecnología en Marcha [En línea] Costa Rica: 2010, vol. 23, nro 1, p. 39-46. [Consultado 28, Junio 2020] Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4835857>

ROJAS, Andrés y FLÓREZ, Cilia. VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE FRUTAS PARACOMBUSTIÓN Y PIRÓLISIS. En: Revista Politécnica. [En línea] Bogotá, Colombia: Politécnico Grancolombiano, 2019, vol. 15, nro.28, p 42-53. [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1395/1164> ISSN 2256-5353

RODRIGUEZ-PIMENTEL, Reyna Isabel y HERNANDEZ-REYES, Adriana. Efecto de diferentes tipos de estiércol en la codigestión de residuos cítricos. En: Revista de Investigación y Desarrollo [En línea] Madrid, España, ECORFAM-Spain. Diciembre, 2018, vol. 4, nro 13, p 29-35 [Consultado 5 de Marzo de 2020] ISSN 2444-4987 Disponible en:

https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Investigacion_y_Development/vol4num13/Revista_de_Investigacion_y_Development_V4_N13.pdf#page=37

ROMAN. Pilar; MARTINEZ. María y PANTOJA Alberto. Manual de compostaje del agricultor [en línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Chile: 2013. p.11. [Consultado 5 de Marzo, 2020] Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf%20ISBN:%20978-92-5-307844-8>

ROZZI, A. y REMIGI, E. Methods of assessing microbial activity and inhibition under anaerobic conditions: a literature review. En: Rev. Environ Sci Biotechnol [En línea]. Milano, Italy: 2004. vol. 3, p. 93–115. [Consultado 11 de Marzo 2020] Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-004-5762-z> ISSN: 1572-9826

RUIZ Begoña; FLOTATS, Xavier. Effect of limonene on batch anaerobic digestion of citrus peel waste. En: Biochemical Engineering Journal [En línea] 2016, vol.109, p.9-18. [Consultado: 28 de Junio de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369703X15301273>

SÁNCHEZ PEDRERO, Lorena Mercedes; LAINES CANEPA, José Ramón; SOSA OLIVER, José Aurelio. Estimación del potencial teórico de biogás en una granja de producción lechera de Tabasco. En: Ciencia UANL [En línea], México, 2016, vol. 19, nro 80, p. 54-57. [Consultado 15, Julio 2020] Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/11247/1/Documento7.pdf> ISSN 1405-9177

SANCHEZ-REYES, Claudian. Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares. En: Rev. Int. Contam. Ambient [En línea]. México: 2016, vol.32, nro.2, pp.191-198. [Consultado 21, Marzo 2020] Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992016000200191&lng=es&nrm=iso ISSN 0188-4999. DOI: <http://dx.doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.05>

Solicitud y pedidos de fruta: Primer semestre. Control. [Excel]. Junio 2020 [Corporación Anónima]

STEPHENSON, Tom y STUETZ, Richard. Principles of Water and Wastewater Treatment Processes - 6. Biological Processes. London: IWA Publishing, 2009. p.138-141 [Consultado: 24 de Marzo de 2020]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00UA1ZH1/principles-water-wastewater/biological-processesvolume/microbiology-anaerobic> ISBN: 978-1-68015-580-8

UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE SERVICIOS. Guía Técnica para el aprovechamiento de Residuos Orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura [en línea] Bogotá D.C. 2016. p.7 [Consultado 19, Septiembre, 2019]. Disponible en: http://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP_SR.pdf

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME). Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. [En línea]. Bogotá, Colombia: UPME, 2003, Informe Final, [Consultado: 24 de Marzo de 2020]. Disponible en: <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1306>

VARNERO, María. Manual del biogás [en línea]. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Chile: 2011. p.15-112 [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf> ISBN: 978-95-306892-0

VIVANCO, Elba; YAYA, Rosa y MOLINA, F. Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales [En línea]. Perú: Red de Tratamiento y reciclaje de aguas industriales mediante soluciones sostenibles fundamentadas en procesos biológicos. (TRITÓN-316RT0506) Programa Cyted, 2018. p.26. [Consultado: 22 de Junio de 2020]. Disponible en: <http://www.cyted.org/es/biblioteca/manual-tecnico-sobre-tecnologias-biologicas-anaerobias-aplicadas-al-tratamiento-de-aguas%20ISBN:%20978-84-09-08638-2>

WIKANDARI, Rachma. Improvement of Biogas Production from Orange Peel Waste by Leaching of Limonene. [En línea] ,2015, p.1-6. [Consultado: 25 de Junio de 2020]. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/bmri/2015/494182/>

YÁNES, Geovanny. Uso de distintos sustratos para el desarrollo de la biomasa bacteriana [En línea]. Tesis de Grado ingeniero en industrias pecuarias. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias Pecuarias. 2016 p. 26-27. [Consultado 3, marzo, 2020] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5788>

ZAGAL, Erick; SADZAWKA, Angélica. PROTOCOLO DE MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA SUELOS Y LODOS. En: Servicio Agrícola y Ganadero SAG [En línea].Chile: Facultad de Agronomía Chillán. Universidad de Concepción, 2007, p.12 [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: http://www.sag.cl/sites/default/files/METODOS_LODOS_SUELOS.pdf

ANEXOS

ANEXO A

PROTOCOLO PARA LA DETERMINACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS Y ALCALINIDAD.

Tabla 24. Determinación AGVs y Alcalinidad

Tesis /Artículo	Resumen del procedimiento
<p style="text-align: center;">PRIMER PROCEDIMIENTO</p> <p>Tomado de: <i>“Estudio de los efectos del pH extremo por adición de NaOH sobre la producción y calidad del biogás y otros parámetros de la digestión anaerobia urbana”</i> (Bote, 2013, pág. 48-52)</p>	<p>Reactivos utilizados: Ácido Sulfúrico (H₂SO₄) 0.1 N, Hidróxido de Sodio (NaOH) 0.1 N</p> <p>Procedimiento</p> <ul style="list-style-type: none"> - Realizar la separación entre las 2 fases del lodo o mezcla del reactor (precipitado y sobrenadante) mediante centrifugación, filtrado, decantado, entre otros. - Agitar el líquido recuperado (sobrenadante) y determinar el pH inicial - Añadir ácido sulfúrico 0.1 N hasta un pH=4 y anotar el volumen consumido de reactivo (V1, ml) - Continuar añadiendo ácido sulfúrico hasta pH=3.5 -Llevar a ebullición el líquido durante 3 minutos y dejar enfriar hasta que alcance temperatura ambiente. - Añadir hidróxido de sodio 0.1 N hasta alcanzar un pH=4 y anotar el volumen consumido de reactivo (V2, ml) - Seguir añadiendo hidróxido de sodio 0.1 N hasta alcanzar un pH=7 y anotar el volumen consumido de reactivo (V3, ml) <p>Determinación de parámetros e índices de alcalinidad</p> <ul style="list-style-type: none"> - Alcalinidad Total (TAC, mg CaCO₃/l) $TAC = V1 * 200$ - Acidez Volátil (AGV, mg CaCO₃/l) $AGV = (V3 - V2) * 200$ - Relación Acidez-Alcalinidad $\frac{AGV}{TAC}$ <p>Operación óptima de la digestión anaerobia: $\frac{AGV}{TAC} < 0.25$</p> <p>Fuente: BOTE, Pedro. Estudio de los efectos del pH extremo por adición de NaOH sobre la producción y calidad del biogás y otros parámetros de la digestión anaerobia. [En línea]. Trabajo fin de Máster en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua. Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales. Alicante, España: 2013. p. 9 [Consultado 28, Junio 2020] Disponible en: https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm-2013-pedro-bote.pdf</p>

Tabla 24. (Continuación)

<p style="text-align: center;">SEGUNDO PROCEDIMIENTO</p> <p style="text-align: center;">Tomado de: <i>“Evaluación del potencial acidogénico para producción de ácidos grasos volátiles (AGV) a partir de lixiviados de los residuos sólidos orgánicos, como plataforma de biorefinería- ANEXO I”</i> (Ortegon,2016)</p>	<p>Reactivos utilizados: Ácido Clorhídrico (HCl) 0.1 N , Hidróxido de Sodio (NaOH) 0.1 N</p> <p>Procedimiento</p> <p>Tomar un volumen de muestra mayor a 50 ml y centrifugarlo a 13.000 rpm durante 10 min a 4°C, decantar el sobrenadante en una probeta hasta los 50 ml, llevar a un vaso precipitado con un agitador magnético a movimiento lento, introducir el electrodo para medir pH, titular con HCl hasta pH=3 El consumo se registra como X (volumen consumido HCl en ml).</p> <p>Tapar el vaso precipitado con papel aluminio agujereado y colocarlo en una plancha de calentamiento a temperatura máxima, estar atento a que aparezca la primera burbuja de ebullición y desde ese momento contabilizar 3 min, cumplido el tiempo interrumpir el calentamiento y esperar 2 min. Titular inmediatamente con NaOH 0.1N hasta un pH= 6.5 (El consumo se registra como Y (volumen consumido NaOH en ml).</p> <p>Determinación de parámetros</p> <p>- Acidez Volátil (AGV) (meq/l) $AGV = \frac{Y (ml) * 0.1 \frac{meq}{ml}}{Volumen muestra (ml)} * 1000$</p> <p>Conversión acidez volátil a mgDQO/l</p> <p>- Acidez Volátil (AGV, mg DQO/l) $AGV = AGV(\frac{meq}{l}) * 100$</p> <p>- Acidez total= $\frac{X (ml) * 0.1 \frac{meq}{ml}}{Volumen muestra (ml)} * 1000$</p> <p>Fuente: ORTEGON, María. Evaluación del potencial acidogénico para producción de ácidos grasos volátiles (AGV) a partir de lixiviados de los residuos sólidos orgánicos, como plataforma de biorefinería-. En: CRAI USTA [En línea] Colombia: Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Santo Tomas, 2016, ANEXO I. [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2471/2016mariaortegon1.pdf?sequence=5&isAllowed=y</p>
--	---

Fuente: elaboración propia

ANEXO B

PROTOCOLO PARA LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES.

Materiales

- Cápsulas de porcelana de 100 ml
- Desecador
- Horno secador 103-105 °C
- Pinzas metálicas para manejo de las cápsulas
- Plancha de calentamiento
- Probetas de vidrio de 100 ml

Preparación de la cápsula de porcelana

- Secar la cápsula en el horno secador precalentado a 105°C durante 2 horas, llevar la cápsula a un desecador y dejar enfriar, como mínimo 2 horas.
- Pesar y registrar el peso de la cápsula seca y vacía (registrar este valor como A)

Procesamiento de la muestra

- Sacar del desecador la cápsula de porcelana correspondiente a la muestra que se va a procesar.
- Agitar la muestra a procesar invirtiendo el recipiente varias veces.
- De la muestra recién agitada, tomar una alícuota de 100 ml medida con probeta, transferir a la cápsula de porcelana correspondiente y pesar nuevamente la capsula de porcelana con el contenido de muestra (registrar este valor como B)
- Colocar la cápsula de porcelana en la plancha de calentamiento, calentar la capsula hasta que el agua de la muestra se haya evaporado completamente.
- Retirar la cápsula de la plancha de calentamiento cuando la muestra se haya secado totalmente.
- Secar la cápsula de porcelana en el horno secador a 103 - 105°C, durante 2 horas.
- Finalizadas las 2 horas de secado, llevar la cápsula al desecador y dejar enfriar aproximadamente por 2 horas, hasta alcanzar la temperatura ambiente.

- Pesar inmediatamente la capsula del desecador, registrar el peso de la cápsula y la muestra seca (tomar este valor como C).

Efectuar los cálculos del porcentaje de solidos totales (%p/p) mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 13. Porcentaje de Solidos Totales

$$\%ST \left(\frac{p}{p} \right) = \frac{C - A}{B - A} * 100\%$$

Fuente: ZAGAL, Erick; SADZAWKA, Angélica. PROTOCOLO DE MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA SUELOS Y LODOS. En: Servicio Agrícola y Ganadero SAG [En línea].Chile: Facultad de Agronomía Chillán. Universidad de Concepción, 2007, p.12 [Consultado: 6 de Marzo de 2020]. Disponible en: http://www.sag.cl/sites/default/files/METODOS_LODOS_SUELOS.pdf

Donde:

A: Peso de la capsula de porcelana vacía, en gramos

B: Peso de la muestra evaluada y capsula de porcelana, en gramos

C: Peso de la muestra secada a 105°C y capsula de porcelana, en gramos

El registro fotográfico de la determinación del porcentaje de solidos totales se observa en la **Ilustración 26** para las 4 relaciones evaluadas (1:1,1:2,1:3,1:4) para cada uno de los residuos seleccionados (naranja, limón y mandarina)

Ilustración 26. Sólidos totales cítricos.



Fuente: elaboración propia

ANEXO C

PREPARACIÓN DEL MEDIO MINERAL Y SOLUCIÓN REDUCTORA.

Se realiza el medio mineral basándose en el medio mineral establecido por Cendales en su proceso de digestión anaerobia. el medio constó de las siguientes soluciones:

Solución stock de minerales

- Solución 1: 27.2 g/l KH_2PO_4 (Fosfato Mono potásico)
- Solución 2: 24 g/l NH_4Cl (Cloruro de amonio), 24 g/l NaCl (Cloruro de Sodio), 8 g $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Cloruro de magnesio hexahidratado)

Medio mineral

Para la preparación de un (1) litro de solución de medio mineral se requieren:

- 15 ml de Solución 1
- 15 ml de Solución 2
- Aforar completamente hasta un (1) litro con agua destilada

Solución reductora: Compuesta por 80 g/l de NaHCO_3 (Bicarbonato de sodio)

ANEXO D

CONSTRUCCION DE TUBERIA MONTAJES EXPERIMENTALES.

Para realizar la construcción de una (1) de las 12 tuberías que conecta a los elementos de los montajes individuales se necesitan los siguientes materiales:

- Tubería de PVC ½" (1 metro)
- Manguera Transparente 3/8" (1 metro)
- 2 Tees "T" de ½" en PVC
- 2 codos 90° de ½" en PVC
- 2 adaptadores hembra de ½" en PVC
- 2 Racores de ¾" a ½" en PVC o 2 Racores de ½" a ½" en PVC (Niple Macho-Macho)
- 2 Adaptadores Tubo-Manguera
- 2 Acoples Macho Manguera 3/8"
- 1 Válvula de Bola de ½" en PVC
- 1 Válvula de Bola de 3/8"
- Soldadura de PVC

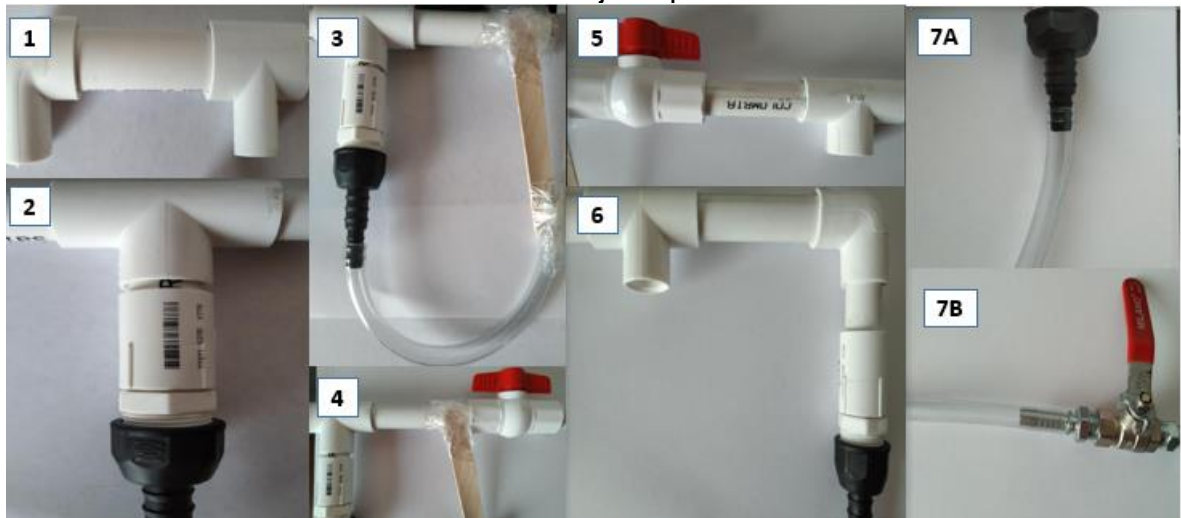
Procedimiento

- Cortar del (1) metro de tubería de PVC ½" 4 tramos de tubería de aproximadamente 10 o 12 cm cada uno.
- Cortar del (1) metro de tubería de PVC ½" 2 tramos de tubería de 2 cm.
- En uno de los tramos de tubería de 10 cm, colocar en uno de sus costados un codo de 90° y en el otro costado una T de ½" (**Imagen 1**); para asegurar estos elementos aplicar soldadura de PVC en los costados de la tubería.
- En el orificio vertical de la T de ½" unida, se adapta el adaptador tubo-manguera mediante la secuencia de los siguientes elementos: Tee ½", tramo de tubería 2 cm, adaptador hembra ½", racor de ¾" a ½", adaptador tubo-manguera (**Imagen 2**); para asegurar estos elementos aplicar soldadura de PVC en los costados de cada uno de estos.
- En el orificio restante de la T de ½", colocar un tramo de tubería de 10 cm.
- En la terminal del adaptador tubo-manguera, se dispone un tramo de manguera transparente 3/8" de 25 cm, se dobla esta manguera de tal manera de que se forme un tubo en U; asegurar este tubo en U mediante un soporte conectado al tramo de tubería de 10 cm (**Imagen 3**). Se debe garantizar que el tubo en U quede completamente fijo y el costado que no se encuentra conectado al adaptador debe estar expuesto a la presión atmosférica.
- Instalar la válvula de bola de ½" en el otro costado del segundo tramo del tubo de PVC de 10 cm y que sostiene al tubo en U. (**Imagen 4**)

- En el costado restante de la válvula de la bola de 1/2" acoplar un tramo de tubería de 1/2" de 10 cm y en el costado restante de este tramo de tubería de 10 cm acoplar una T de 1/2" (**Imagen 5**); para asegurar estos elementos aplicar soldadura de PVC en los costados de cada uno de estos.
- En el orificio horizontal restante de la T de 1/2", colocar un tramo de tubería de 10 cm y en el costado restante de este tramo de tubería de 10 cm colocar un codo de 90°; para asegurar estos elementos aplicar soldadura de PVC en los costados de cada uno de estos.
- En el codo de 90° se coloca el adaptador tubo-manguera mediante la secuencia de los siguientes elementos: codo 90°, tramo de tubería 2 cm, adaptador hembra 1/2", racor de 3/4" a 1/2", adaptador tubo-manguera (**Imagen 6**); para asegurar estos elementos aplicar soldadura de PVC en los costados de cada uno de estos.
- En la terminal del adaptador tubo-manguera, se dispone un tramo de manguera transparente 3/8" de 30 cm (**Imagen 7A**); el otro costado de la manguera se conecta a un acople macho manguera 3/8" que se encuentra acoplado a la válvula de bola de 3/8" (**Imagen 7B**).

El registro fotográfico de cada una de las indicaciones en la construcción de la tubería, se encuentran en la **Ilustración 27** acorde al procedimiento anteriormente mencionado

Ilustración 27. Tramos de Tubería Montaje Experimental



Fuente: elaboración propia

Los orificios restantes de la tubería que no se encuentran conectados son acoplados a los elementos del montaje experimental de la siguiente manera:

- Reactor: Acoplado al codo de 90° mediante un tramo de tubería de PVC 1/2"

- Envase de plástico (Tanque de almacenamiento): Es conectado al orificio vertical de la T de 1/2" mediante un tramo de tubería de PVC 1/2"
- Bolsa Cystoflo: Instalada a la válvula de bola de 3/8" mediante un acople macho manguera 3/8".

La construcción final de la tubería para cada montaje individual se puede observar en la **Ilustración 28**; como se mencionó anteriormente los orificios que no se encuentran conectados van acoplados a los elementos del montaje experimental (reactor y tanque de almacenamiento en la disposición mencionada).

Ilustración 28. Tubería Montaje Individual



Fuente: elaboración propia

ANEXO E

INSTRUMENTOS Y MATERIALES PARA LA CONSTRUCCION DE LOS MONTAJES EXPERIMENTALES

Tabla 25. Costos Montajes

Cantidad	Elemento	Costo Unitario (COP)	Costo total (COP)
24	Acople Macho- Manguera 3/8"	\$3010.0	\$72240.0
12	Adaptador Macho 1/2"	\$250.0	\$3000.0
36	Adaptador Hembra 1/2"	\$350.0	\$12600.0
24	Adaptador Tubo 1/2"-Manguera 3/8"	\$2400.0	\$57600.0
12	Bolsas Cystoflo	\$5450.0	\$65400.0
4	Bombillas Incandescentes 150 W	\$4500.0	\$18000.0
2	Metro de cable de cobre	\$1000.0	\$2000.0
2	Clavijas Conexión Toma Corriente	\$2000.0	\$4000.0
24	Codo Presión 90° 1/2"	\$450.0	\$10800.0
12	Cortes de Tarro Plástico (Diámetro 1/2")	\$500.0	\$6000.0
12	Cortes de Tarro Vidrio (Diámetro 1/2")	\$5000.0	\$60000.0
12	Empaques de Caucho o Pasacables 1/2"	\$2000.0	\$24000.0
2	Fuente 12 Voltios Termostato Arduino	\$10000.0	\$20000.0
12	Llaves de Recipiente de Vidrio (Muestreo)	\$3200.0	\$38400.0
8	Metros Manguera Transparente 3/8"	\$1200.0	\$9600.0
2	Neveras Poliestireno Expandido 60 Litros	\$30400.0	\$60800.0
24	Racor 3/4" a 1/2" (Niple Macho-Macho)	\$2500.0	\$60000.0
12	Recipientes de Vidrio 4 Litros	\$4700.0	\$56400.0
4	Rosetas Bombillos	\$1800.0	\$7200.0
2	Siliconas Transparente Sista	\$17200.0	\$34400.0
3	Soldadura PVC 1/128 Galón	\$4400.0	\$13200.0
12	Tarros de Plástico	\$1600.0	\$19200.0
24	Tee o "T" 1/2"	\$650.0	\$15600.0
24	Termómetros de Sonda	\$8000.0	\$192000.0
2	Termostato W1209	\$10000.0	\$20000.0
10	Metros Tubería PVC 1/2"	\$2500.0	\$25000.0
12	Válvula de Bola 3/8"	\$7400.0	\$88800.0
24	Válvulas Bola 1/2"	\$4000.0	\$96000.0
	TOTAL (COP)		\$1'092.240

Fuente: elaboración propia

ANEXO F

CONSTRUCCION DEL MONTAJE PARA LA CUANTIFICACION DE METANO

Montaje de cuantificación de metano para muestras de biogás con alto contenido de metano. Para realizar la construcción del montaje experimental para la cuantificación de metano se necesitan los siguientes materiales:

- Tubería de PVC 1/2" agua caliente (3 cm)
- Manguera Transparente rígida 3/8" (20 cm)
- 2 recipientes de vidrio de 500 gr con tapa
- 3 codos 90° roscados de 1/2" agua caliente en PVC
- 4 adaptadores macho de 1/2" agua caliente en PVC
- 2 Racores de 3/8" a 1/2" en PVC (Niple Macho-Macho)
- 4 Acoples Macho Manguera 3/8"
- 1 Unión roscada 3/8" galvanizada
- 4 empaques de caucho

Procedimiento

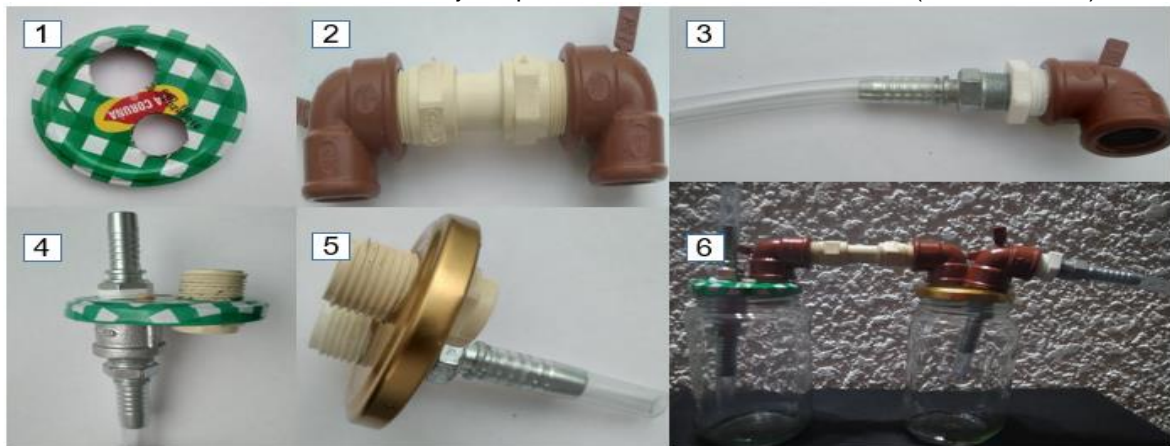
- Realizar dos perforaciones en cada una de las tapas de los recipientes de vidrio, en base a los diámetros nominales de los accesorios. En la tapa del primer recipiente realizar una (1) perforación del diámetro nominal del acople macho manguera 3/8" y una (1) perforación del diámetro nominal del adaptador macho 1/2" (**Imagen 1**), en el segundo recipiente perforar agujeros con el diámetro nominal del adaptador macho 1/2" y el racor 3/8" a 1/2".
- En el orificio horizontal de 2 codos de 90° roscados de 1/2", acoplar un adaptador macho 1/2" en cada uno de los codos, posteriormente se deberá unir ambos adaptadores macho con el tramo de tubería de PVC 1/2" (**Imagen 2**).
- En el orificio vertical del codo 90° roscado de 1/2" restante, instalar un racor 3/8" a 1/2", al racor en su costado de 3/8" se le debe adaptar un (1) acople macho manguera 3/8" unido por un tramo de manguera de 10 cm (**Imagen 3**).
- Adaptar acorde a los agujeros perforados anteriormente en la tapa del primer recipiente, la unión roscada 3/8" galvanizada junto con 2 acoples macho manguera 3/8", los extremos de estos acoples macho manguera están conectados a tramos de manguera de 3 cm. En la otra perforación instalar un (1) adaptador macho 1/2" (**Imagen 4**); se debe garantizar que no existan fugas en la tapa por lo que se recomienda colocar un (1) empaque de caucho por cada perforación realizada.
- Adaptar acorde a los agujeros perforados anteriormente en la tapa del segundo recipiente, un (1) adaptador macho 1/2" y un (1) racor 3/8" a 1/2", al racor en su costado de 3/8" se le debe adaptar (1) un acople macho manguera 3/8" unido por un tramo

de manguera de 3 cm (**Imagen 5**); se debe garantizar que no existan fugas en la tapa por lo que se recomienda colocar un (1) empaque de caucho por cada perforación realizada.

- Instalar la unión de codos 90° (**Imagen 2**) en los adaptadores macho 1/2" del primer recipiente y segundo recipiente, de ser necesario retirar el acople macho manguera 3/8" superior de la tapa del primer recipiente. Instalar el tramo del codo restante (**Imagen 3**) en el racor 3/8" a 1/2" del segundo recipiente en la conexión de 1/2" (**Imagen 6**).

El registro fotográfico de cada una de las indicaciones en la construcción del montaje experimental, se encuentran en la **Ilustración 29** acorde al procedimiento anteriormente mencionado.

Ilustración 29. Indicaciones Montaje Experimental cuantificación metano (alto contenido)



Fuente: elaboración propia

Montaje de cuantificación de metano para muestras de biogás con bajo contenido de metano. Para realizar la construcción del montaje experimental para la cuantificación de metano se necesitan los siguientes materiales:

- Manguera Transparente 2 mm (6 cm)
- Manguera Transparente rígida 3/8" (3 cm)
- 2 recipientes de vidrio de 200 gr con tapa
- 2 Acoples Macho Manguera 3/8"
- 1 Unión roscada 3/8" galvanizada
- Tubo plástico acodado de polietileno rígido 2 mm (10 cm)

Procedimiento

- Realizar dos perforaciones en cada una de las tapas de los recipientes de vidrio, en base a los diámetros nominales de los accesorios. En la tapa del primer

recipiente realizar una (1) perforación del diámetro nominal del acople mancho manguera 3/8" y una (1) perforación del diámetro de la manguera transparente 2 mm (**Imagen 1**), en el segundo recipiente perforar agujeros con el diámetro nominal de la manguera transparente 2 mm y el tubo plástico de polietileno 2 mm.

- Adaptar acorde a los agujeros perforados anteriormente en la tapa del primer recipiente, la unión roscada 3/8" galvanizada junto con 2 acoples macho manguera 3/8", uno de los extremos de estos acoples macho manguera está conectado a un tramo de manguera 3/8" de 3 cm, donde se ajustará la jeringa que contiene el biogás. En la otra perforación instalar uno de los costados de la manguera transparente 2 mm (**Imagen 2**); se debe garantizar que no existan fugas en la tapa del recipiente por lo que se recomienda sellar los orificios con silicona transparente.

- Adaptar acorde a los agujeros perforados anteriormente en la tapa del segundo recipiente, en uno de los orificios el otro costado de la manguera transparente 2 mm y en el segundo orificio el tubo de polietileno rígido (**Imagen 3**); se debe garantizar que no existan fugas en la tapa del recipiente por lo que se recomienda sellar los orificios con silicona transparente.

- Asegurar las tapas de cada uno de los recipientes y realizar la conexión entre los 2 recipientes de vidrio garantizando de que no se presenten fugas en el montaje experimental final (**Imagen 4**), colocar un recipiente de en la conexión del tubo plástico para recolectar el agua desplazada. El registro fotográfico de cada una de las indicaciones en la construcción del montaje experimental, se encuentran en la **Ilustración 30** acorde al procedimiento anteriormente mencionado.

Ilustración 30. Indicaciones Montaje Experimental cuantificación metano (bajo contenido)



Fuente: elaboracion propia

Para ambos montajes el primer recipiente de vidrio debe contener la solución de KOH o NaOH 2N y el segundo recipiente debe estar con agua destilada o potable.

ANEXO G

RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA DETERMINACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES, ALCALINIDAD Y SÓLIDOS TOTALES.

Tabla 26. Resultados para ácidos grasos volátiles y alcalinidad

Residuo	Relación	pH	Ácidos grasos volátiles			
			Dilución 1:10		Dilución 1:10 mg Ac/L	
			V H ₂ SO ₄ (ml)	V NaOH (ml)	Alcalinidad (mgCaCo ₃ /L)	AGV'S (mgHAc/L)
Cascara de Naranja	1:1	4.68	2.44	1.2	2440	1440
	1:2	4.68	2.33	1.24	2330	1488
	1:3	5.13	2.65	1.25	2650	1500
	1:4	4.93	2.33	1.07	2330	1284
Cascara de Limón	1:1	3.23	2.14	5.27	2140	6324
	1:2	3.25	1.66	3.31	1660	3972
	1:3	3.26	1.57	2.67	1570	3204
	1:4	3.38	2.38	2.06	2380	2472
Cascara de Mandarina	1:1	4.64	3.06	1.64	3060	1968
	1:2	5.09	1.5	0.35	1500	420
	1:3	5.15	2.1	1.15	2100	1380
	1:4	5.29	1.09	0.71	1090	852

Fuente: elaboración propia

Tabla 27. Pesos y porcentaje de sólidos totales de las muestras para determinación de sólidos totales.

Residuo	Relación	Peso Capsula Vacía (g)	Peso Muestra+ Capsula (g)	Peso Secado+ Capsula (g)	%Sólidos totales (p/p)
Cáscara de Naranja	1:1	57.19	100.75	81.35	55.46
	1:2	70.83	120.95	77.02	12.35
	1:3	85.16	134.25	87.89	5.55
	1:4	79.42	125.98	81.89	5.31
Cáscara de Limón	1:1	98.06	119.04	110.15	57.65
	1:2	53.88	104.06	66.55	25.25
	1:3	87	139.22	95.29	15.88
	1:4	52.21	101.37	54.47	4.60
Cáscara de Mandarina	1:1	52.23	101.1	68.56	33.43
	1:2	71.2	121.27	74.05	5.68
	1:3	87.87	137.42	89.98	4.26
	1:4	53.58	102.74	55.02	2.92

Fuente: elaboración propia

ANEXO H

RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA PRIMERA ETAPA

Tabla 28. Resultados Etapa 1 Experimento Original

Experimento Original											
Fecha	Temperatura externa (°C)	Prueba	Temperatura Gas (°C)	Temperatura Mezcla (°C)	pH mezcla	V1 (ml)	V2 (ml)	V3 (ml)	Alcalinidad Total (TAC)	Acidez Volátil (AGV)	AGV/TAC
22/05/2020	37.6	1:2 Estiércol	39.9	34.9	6.43	10	2	7.5	2000	1100	0.550
		1:3 Estiércol	40.6	36	7.05	7	2	4.9	1400	580	0.414
		1:4 Estiércol	39.3	35.2	6.9	5.9	1.2	6	1180	960	0.814
		1:2 sin Estiércol	39.1	35.8	5.12	9	4	13.5	1800	1900	1.056
		1:3 sin Estiércol	40.1	35.1	5.68	8.3	4.6	11.6	1660	1400	0.843
		1:4 sin Estiércol	37.9	30.6	5.42	7.4	3.4	11.4	1480	1600	1.081
24/05/2020	38.1	1:2 Estiércol	40.3	34.8	6.15	11	1.4	9.1	2200	1540	0.700
		1:3 Estiércol	40.9	35.5	6.27	7.3	1.2	5.3	1460	820	0.562
		1:4 Estiércol	39.9	34.1	6.41	9	1.4	7.65	1800	1250	0.694
		1:2 sin Estiércol	39.2	36.3	4.69	7.8	4.4	13	1560	1720	1.103
		1:3 sin Estiércol	40.8	35	4.99	9.8	4.3	13.9	1960	1920	0.980
		1:4 sin Estiércol	38.2	30.1	4.9	9	4.1	12.5	1800	1680	0.933
26/05/2020	37.7	1:2 Estiércol	39.4	36.1	6.89	10	1.4	6.8	2000	1080	0.540
		1:3 Estiércol	41.4	34.8	6.51	7.4	1.2	7.3	1480	1220	0.824
		1:4 Estiércol	38.2	29.2	7.2	6.5	0.6	4.2	1300	720	0.554
		1:2 sin Estiércol	41.4	34.4	5.05	7.4	4.2	12.9	1480	1740	1.176
		1:3 sin Estiércol	41.6	35.3	5.52	10	2.8	9.8	2000	1400	0.700
		1:4 sin Estiércol	40.1	33.6	5.49	8.9	2.8	10.2	1780	1480	0.831
28/05/2020	38.1	1:2 Estiércol	40.3	34.4	5.48	10.4	2.6	11.1	2080	1700	0.817
		1:3 Estiércol	41.3	35.1	5.69	8	2.5	10.7	1600	1640	1.025
		1:4 Estiércol	40.1	33.6	5.82	7.2	1.8	7.2	1440	1080	0.750
		1:2 sin Estiércol	35.9	39.5	4.65	6.6	4.6	20.1	1320	3100	2.348

Tabla 28. (Continuación)

Fecha	Temperatura externa (°C)	Prueba	Temperatura Gas (°C)	Temperatura Mezcla (°C)	pH mezcla	V1 (ml)	V2 (ml)	V3 (ml)	Alcalinidad Total (TAC)	Acidez Volátil (AGV)	AGV/TAC
28/05/2020	38.1	1:3 sin Estiércol	41.6	34.9	4.89	7.4	4.6	16.8	1480	2440	1.649
		1:4 sin Estiércol	38.3	29.4	4.79	7	3	14.7	1400	2340	1.671
30/05/2020	37.8	1:2 Estiércol	40.5	34.3	5.16	9.7	2.4	12.9	1940	2100	1.082
		1:3 Estiércol	41.5	34.8	5.34	8.2	2.2	8.8	1640	1320	0.805
		1:4 Estiércol	40.3	33.3	6.16	7.5	1.7	4.5	1500	560	0.373
		1:2 sin Estiércol	39.5	35.8	4.59	6.6	4.2	15	1320	2160	1.636
		1:3 sin Estiércol	41.8	34.8	4.9	8.5	4.3	13	1700	1740	1.024
		1:4 sin Estiércol	40.2	29.9	4.96	8.2	3.6	12.2	1640	1720	1.049
01/06/2020	38.1	1:2 Estiércol	40.5	34.4	5.11	9.8	2.5	11.8	1960	1860	0.949
		1:3 Estiércol	41.4	34.8	5.32	8.6	2.4	9.4	1720	1400	0.814
		1:4 Estiércol	40.3	33.4	6.13	7.8	1.8	4.7	1560	580	0.372
		1:2 sin Estiércol	39.4	35.8	4.52	6.1	4.3	15	1220	2140	1.754
		1:3 sin Estiércol	41.8	34.9	5.02	9.2	4.2	11.4	1840	1440	0.783
		1:4 sin Estiércol	39.6	30.1	5.06	9.6	3.6	12.5	1920	1780	0.927
03/06/2020	37.6	1:2 Estiércol	40.4	34.3	5.08	10.6	2.7	10.9	2120	1640	0.774
		1:3 Estiércol	41.2	35.1	5.42	7.3	1.8	8	1460	1240	0.849
		1:4 Estiércol	40.3	33.6	6.24	6.6	1.4	4.4	1320	600	0.455
		1:2 sin Estiércol	39.4	35.9	4.62	7.1	4.2	15.6	1420	2280	1.606
		1:3 sin Estiércol	41.7	35.1	5.08	9.6	4	10.1	1920	1220	0.635
		1:4 sin Estiércol	39.1	30.3	5.13	10.3	3.6	12	2060	1680	0.816
05/06/2020	37.7	1:2 Estiércol	40.4	34.4	5.12	10	2.5	10.3	2000	1560	0.780
		1:3 Estiércol	41.3	35.1	5.5	6.8	1.4	6.1	1360	940	0.691
		1:4 Estiércol	40.3	33.6	6.37	6.4	1.2	4.1	1280	580	0.453
		1:2 sin Estiércol	39.4	35.9	4.73	8.8	4.8	15.8	1760	2200	1.250
		1:3 sin Estiércol	41.8	35.3	5.12	10.1	4.8	8	2020	640	0.317

Tabla 28. (Continuación)

Fecha	Temperatura externa (°C)	Prueba	Temperatura Gas (°C)	Temperatura Mezcla (°C)	pH mezcla	V1 (ml)	V2 (ml)	V3 (ml)	Alcalinidad Total (TAC)	Acidez Volátil (AGV)	AGV/TAC
05/06/2020	37.7	1:4 sin Estiércol	38.4	30.3	5.22	10.7	3.7	11.4	2140	1540	0.720
07/06/2020	38	1:2 Estiércol	40.6	34.3	5.02	9.2	2.8	10.9	1840	1620	0.880
		1:3 Estiércol	41.5	35.1	5.28	8.1	2.4	7.9	1620	1100	0.679
		1:4 Estiércol	40.4	33.4	6.16	6.7	1.6	5.3	1340	740	0.552
		1:2 sin Estiércol	39.7	35.8	4.6	7.2	4.8	15.2	1440	2080	1.444
		1:3 sin Estiércol	42	35.3	4.93	8.7	4.3	11.8	1740	1500	0.862
		1:4 sin Estiércol	38.6	29.6	5.32	10	3.6	8.3	2000	940	0.470
09/06/2020	37.8	1:2 Estiércol	40.3	34.9	5.11	9.2	2.1	11.1	1840	1800	0.978
		1:3 Estiércol	41.1	35.3	5.41	5.4	1.4	6.7	1080	1060	0.981
		1:4 Estiércol	40.3	33.8	6.06	8.4	1.2	6.4	1680	1040	0.619
		1:2 sin Estiércol	39.8	36.1	4.76	8.6	4.5	17.1	1720	2520	1.465
		1:3 sin Estiércol	41.8	35.5	5.05	9.8	4.3	13.1	1960	1760	0.898
		1:4 sin Estiércol	38.6	30.4	5.54	8.7	2.2	7.8	1740	1120	0.644
11/06/2020	37.9	1:2 Estiércol	40.4	35	5.23	9.6	2.1	11.1	1920	1800	0.938
		1:3 Estiércol	41.3	35.6	5.43	6.2	1.4	6.8	1240	1080	0.871
		1:4 Estiércol	40.4	34.1	6.12	8.6	1.2	6.3	1720	1020	0.593
		1:2 sin Estiércol	39.8	36.2	4.78	9.2	4.2	17.3	1840	2620	1.424
		1:3 sin Estiércol	41.7	35.6	5.1	10.7	3.9	14.7	2140	2160	1.009
		1:4 sin Estiércol	39.4	30.5	5.62	10.2	2.4	12.1	2040	1940	0.951
13/06/2020	37.8	1:2 Estiércol	40.6	35.1	5.36	10.4	2	11.1	2080	1820	0.875
		1:3 Estiércol	41.6	35.8	5.52	8	1.5	7.1	1600	1120	0.700
		1:4 Estiércol	40.5	34.1	6.2	9	1.2	6.2	1800	1000	0.556
		1:2 sin Estiércol	39.7	36.2	4.94	11.2	4.1	17.2	2240	2620	1.170
		1:3 sin Estiércol	41.9	35.9	5.12	12.6	3	16.4	2520	2680	1.063
		1:4 sin Estiércol	39.7	30.5	5.73	11.8	2.2	14	2360	2360	1.000

Tabla 28. (Continuación)

Fecha	Temperatura externa (°C)	Prueba	Temperatura Gas (°C)	Temperatura Mezcla (°C)	pH mezcla	V1 (ml)	V2 (ml)	V3 (ml)	Alcalinidad Total (TAC)	Acidez Volátil (AGV)	AGV/TAC
15/06/2020	37.6	1:2 estiércol	40.6	35.3	5.17	11.2	2.8	13	2240	2040	0.911
		1:3 Estiércol	41.7	35.7	5.31	9.1	1.9	7.6	1820	1140	0.626
		1:4 Estiércol	40.4	34.3	6.1	8.1	1.6	5.9	1620	860	0.531
		1:2 sin Estiércol	39.7	36.2	4.82	10.5	4.5	16.9	2100	2480	1.181
		1:3 sin Estiércol	41.8	36.1	5.02	11.6	4.4	15.2	2320	2160	0.931
		1:4 sin Estiércol	38.7	30.6	5.92	14.9	3	12.6	2980	1920	0.644
17/06/2020	37.6	1:2 Estiércol	40.9	35.1	5.17	10.4	1.9	16.9	2080	3000	1.442
		1:3 Estiércol	41.7	35.7	5.41	6.6	1.2	8.8	1320	1520	1.152
		1:4 Estiércol	40.4	34.3	6.12	7.2	1.2	6	1440	960	0.667
		1:2 sin Estiércol	39.7	36.2	4.92	9.4	4	16.2	1880	2440	1.298
		1:3 sin Estiércol	41.8	36.1	5.05	11.4	4	14	2280	2000	0.877
		1:4 sin Estiércol	38.7	30.6	5.86	14.4	2.7	12.9	2880	2040	0.708

Fuente: elaboración propia

Tabla 29. Resultados Etapa 1 Experimento Réplica

Experimento Réplica											
Fecha	Temperatura externa (°C)	Prueba	Temperatura Gas (°C)	Temperatura Mezcla (°C)	pH mezcla	V1 (ml)	V2(ml)	V3 (ml)	Alcalinidad Total (TAC)	Acidez Volátil (AGV)	AGV/TAC
22/05/2020	37.5	1:2 Estiércol	40.9	36.1	6.45	9.2	2.2	10.1	1840	1580	0.86
		1:3 Estiércol	40.4	35.6	6.54	4.6	1.2	5	920	760	0.83
		1:4 Estiércol	38.9	31.2	7.2	5.9	1.2	4.6	1180	680	0.58
		1:2 sin Estiércol	40.6	35.1	5.33	10	4.1	17.8	2000	2740	1.37
		1:3 sin Estiércol	41.5	39.9	5.87	11.6	3.8	17	2320	2640	1.14
		1:4 sin Estiércol	39.4	33	5.57	9.2	3.7	15.2	1840	2300	1.25
24/05/2020	37.8	1:2 Estiércol	43.3	33.7	6.32	8.1	1.8	9.6	1620	1560	0.96

Tabla 29. (Continuación)

Fecha	Temperatura externa (°C)	Prueba	Temperatura Gas (°C)	Temperatura Mezcla (°C)	pH mezcla	V1 (ml)	V2(ml)	V3 (ml)	Alcalinidad Total (TAC)	Acidez Volátil (AGV)	AGV/TAC
24/05/2020	37.8	1:3 Estiércol	43.8	32.5	5.93	8.2	1.4	8.5	1640	1420	0.87
		1:4 Estiércol	41.9	27.7	6.71	6.6	0.8	5.1	1320	860	0.65
		1:2 sin Estiércol	42.3	31.7	4.62	4.6	4.4	21.2	920	3360	3.65
		1:3 sin Estiércol	44.2	40.7	5.04	8	4	12.6	1600	1720	1.08
		1:4 sin Estiércol	41.4	37.3	5.13	6.6	4	12.2	1320	1640	1.24
26/05/2020	37.7	1:2 Estiércol	42	34.8	6.12	7	1.6	5.6	1400	800	0.57
		1:3 Estiércol	42.8	39.9	6.53	5.1	0.6	4.7	1020	820	0.80
		1:4 Estiércol	40.2	31.1	8.39	6.8	0.6	4.8	1360	840	0.62
		1:2 sin Estiércol	40.9	32.6	4.04	1.8	4	9.4	360	1080	3.00
		1:3 sin Estiércol	42.2	33.8	5.7	7	2.2	12.3	1400	2020	1.44
		1:4 sin Estiércol	40.3	28.3	5.83	5.4	1.8	8.9	1080	1420	1.31
28/05/2020	37.8	1:2 Estiércol	42.2	35.6	5.31	2.6	1.4	5.1	520	740	1.42
		1:3 Estiércol	41.9	34.4	5.14	4.7	2.4	11.2	940	1760	1.87
		1:4 Estiércol	40.1	29.9	5.86	6.5	1.8	7.1	1300	1060	0.82
		1:2 sin Estiércol	40.8	33.6	4.38	3.8	5	18	760	2600	3.42
		1:3 sin Estiércol	42.3	40.2	4.63	7.6	5	22.4	1520	3480	2.29
		1:4 sin Estiércol	40.3	32.6	4.82	7.1	5.2	16.8	1420	2320	1.63
30/05/2020	37.9	1:2 Estiércol	42	35.8	5.08	9.2	2.8	15.9	1840	2620	1.42
		1:3 Estiércol	41.4	35.1	5	6.9	2.1	11.4	1380	1860	1.35
		1:4 Estiércol	39.8	30.9	5.56	5.3	1.4	6.9	1060	1100	1.04
		1:2 sin Estiércol	40.6	34.1	4.47	5.6	4.4	18.2	1120	2760	2.46
		1:3 sin Estiércol	42.2	39.8	4.66	7.1	5.1	19.5	1420	2880	2.03
		1:4 sin Estiércol	39.9	33.3	4.98	9.2	5.5	18.1	1840	2520	1.37
01/06/2020	37.6	1:2 Estiércol	41.7	35.8	5.06	8.8	3.2	14.6	1760	2280	1.30
		1:3 Estiércol	41.4	35.1	5.05	7.1	2.3	11	1420	1740	1.23
		1:4 Estiércol	40	31	5.46	4.6	1.5	7	920	1100	1.20

Tabla 29. (Continuación)

Fecha	Temperatura externa (°C)	Prueba	Temperatura Gas (°C)	Temperatura Mezcla (°C)	pH mezcla	V1 (ml)	V2(ml)	V3 (ml)	Alcalinidad Total (TAC)	Acidez Volátil (AGV)	AGV/TAC
01/06/2020	37.6	1:2 sin Estiércol	40.4	34.2	4.5	7.5	4.2	19.8	1500	3120	2.08
		1:3 sin Estiércol	42.1	39.8	4.62	6.9	4.9	19.7	1380	2960	2.14
		1:4 sin Estiércol	40	33.4	4.91	8.8	5.2	17.5	1760	2460	1.40
03/06/2020	37.9	1:2 Estiércol	41.6	35.8	5.03	8.3	2.8	14	1660	2240	1.35
		1:3 Estiércol	41.3	35.1	5.09	7.2	2.5	10.5	1440	1600	1.11
		1:4 Estiércol	40.1	31.1	5.32	4.1	1.6	6.9	820	1060	1.29
		1:2 sin Estiércol	40.5	34.2	4.45	5.3	4.2	19.2	1060	3000	2.83
		1:3 sin Estiércol	42.1	39.9	4.7	7.4	5.8	19.3	1480	2700	1.82
		1:4 sin Estiércol	40.2	33.5	4.83	7.8	4.6	13.1	1560	1700	1.09
05/06/2020	37.8	1:2 Estiércol	41.5	35.8	5.02	8	2	13.5	1600	2300	1.44
		1:3 Estiércol	41.2	35.1	5.11	7.4	2.5	10.6	1480	1620	1.09
		1:4 Estiércol	40.1	31.1	5.23	3.8	1.7	7.1	760	1080	1.42
		1:2 sin Estiércol	40.3	34.2	4.58	8.2	5.6	20.8	1640	3040	1.85
		1:3 sin Estiércol	42.1	39.9	4.71	7.6	5	19.6	1520	2920	1.92
		1:4 sin Estiércol	40.2	33.5	4.86	8.4	4.8	13.4	1680	1720	1.02
07/06/2020	37.8	1:2 Estiércol	41.9	35.4	4.98	5.6	2.2	5.9	1120	740	0.66
		1:3 Estiércol	41.3	34.7	5.13	6	1.5	6.5	1200	1000	0.83
		1:4 Estiércol	40	30.6	5.07	7	2.3	8	1400	1140	0.81
		1:2 sin Estiércol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		1:3 sin Estiércol	42.4	39.8	4.7	8	5	20.3	1600	3060	1.91
		1:4 sin Estiércol	40.2	32.8	4.97	8	4.1	14	1600	1980	1.24
09/06/2020	37.6	1:2 Estiércol	41.8	36	5.1	7.1	1.9	10.1	1420	1640	1.15
		1:3 Estiércol	41.6	35.3	5.41	9.2	2.4	10.7	1840	1660	0.90
		1:4 Estiércol	40.3	31.4	5.07	7.3	2.5	12	1460	1900	1.30
		1:2 sin Estiércol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		1:3 sin Estiércol	42.4	39.8	5.08	12.6	5.6	24	2520	3680	1.46

Tabla 29. (Continuación)

Fecha	Temperatura externa (°C)	Prueba	Temperatura Gas (°C)	Temperatura Mezcla (°C)	pH mezcla	V1 (ml)	V2(ml)	V3 (ml)	Alcalinidad Total (TAC)	Acidez Volátil (AGV)	AGV/TAC	
09/06/2020	37.6	1:4 sin Estiércol	40.2	33.6	5.13	10.2	5	17	2040	2400	1.18	
11/06/2020	37.5	1:2 Estiércol	42	35.9	5.15	7.6	2	13.5	1520	2300	1.51	
		1:3 Estiércol	41.7	35.2	5.38	9	1.5	10.5	1800	1800	1.00	
		1:4 Estiércol	40.4	31.3	5.09	7.5	2.3	12.6	1500	2060	1.37	
		1:2 sin Estiércol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		1:3 sin Estiércol	42.5	39.8	4.98	11.8	4.8	22.5	2360	3540	1.50	
		1:4 sin Estiércol	40.3	33.5	5.07	10.8	3.8	17.6	2160	2760	1.28	
13/06/2020	38	1:2 Estiércol	42.1	35.9	5.24	8.2	1.4	11.2	1640	1960	1.20	
		1:3 Estiércol	41.9	35.2	5.34	7	1.6	8.6	1400	1400	1.00	
		1:4 Estiércol	40.5	31.2	5.1	9.2	2	13.1	1840	2220	1.21	
		1:2 sin Estiércol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		1:3 sin Estiércol	42.6	39.8	4.88	11.1	5	21.6	2220	3320	1.50	
		1:4 sin Estiércol	40.3	33.4	5.2	12	3.6	19.3	2400	3140	1.31	
15/06/2020	38	1:2 Estiércol	42	35.5	5.03	9.2	1.8	12.2	1840	2080	1.13	
		1:3 Estiércol	42	35.4	5.14	8.4	1.6	11.8	1680	2040	1.21	
		1:4 Estiércol	40.6	31.5	5.06	7.8	1.2	11.2	1560	2000	1.28	
		1:2 sin Estiércol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		1:3 sin Estiércol	42.5	39.8	4.83	10	4.4	23.1	2000	3740	1.87	
		1:4 sin Estiércol	40.4	36.6	5.33	11.8	3.7	17.5	2360	2760	1.17	
17/06/2020	37.8	1:2 Estiércol	42.1	35.8	4.92	7.8	1.2	10.6	1560	1880	1.21	
		1:3 Estiércol	42.4	35.3	5.12	6.4	1.2	7.2	1280	1200	0.94	
		1:4 Estiércol	40.9	31	4.93	7.3	1.2	10.2	1460	1800	1.23	
		1:2 sin Estiércol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		1:3 sin Estiércol	43.1	39.9	4.83	7.4	2.8	12.4	1480	1920	1.30	
		1:4 sin Estiércol	40.8	36.4	5.33	11.2	3	12.9	2240	1980	0.88	

Fuente: elaboración propia

ANEXO I

RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA SEGUNDA ETAPA

Tabla 30. Resultados Etapa 2

ETAPA 2											
Fecha	Temperatura externa (°C)	Prueba	Temperatura Gas (°C)	Temperatura Mezcla (°C)	pH mezcla	V1 (ml)	V2 (ml)	V3 (ml)	Alcalinidad Total (TAC)	Acidez Volátil (AGV)	AGV/TAC
23/06/2020	37.5	1:2 Inoculo	42.8	36.9	7.72	27.4	0.7	5.3	5480	920	0.17
		1:3 Inoculo	43.7	36.9	7.97	32.5	0.4	2.7	6500	460	0.07
		1:4 Inoculo	42.8	31.8	8.21	28.2	0.4	1.6	5640	240	0.04
		1:2 Inoculo	45.5	37.1	7.78	28	0.9	5.7	5600	960	0.17
		1:3 Inoculo	43.1	37.4	8	31.4	0.7	4.1	6280	680	0.11
		1:4 Inoculo	41.8	33.5	7.91	32	1	4.9	6400	780	0.12
25/06/2020	37.7	1:2 Inoculo	43.9	37	7.81	30	1.1	5.3	6000	840	0.14
		1:3 Inoculo	44.6	36.5	8.17	30.4	0.6	1.1	6080	100	0.02
		1:4 Inoculo	43.9	31.6	8.21	28.5	0.3	1.2	5700	180	0.03
		1:2 Inoculo	46.4	37.3	7.76	26.8	0.8	4.3	5360	700	0.13
		1:3 Inoculo	44.2	37.7	7.86	31.5	0.6	3	6300	480	0.08
		1:4 Inoculo	42.8	33.2	7.96	24	0.4	2.4	4800	400	0.08
27/06/2020	37.9	1:2 Inoculo	44.7	37	7.83	31.5	1	5.4	6300	880	0.14
		1:3 Inoculo	44.8	36.6	8.06	30.2	0.4	1.3	6040	180	0.03
		1:4 Inoculo	44	31.6	8.25	29.6	0.2	1.2	5920	200	0.03
		1:2 Inoculo	46.6	37.3	7.85	28.6	0.6	3.2	5720	520	0.09
		1:3 Inoculo	44.2	37.7	7.92	29.2	0.4	1.8	5840	280	0.05
		1:4 Inoculo	42.9	33.4	7.96	26.9	0.3	1.2	5380	180	0.03
29/06/2020	37.5	1:2 Inoculo	45.8	36.2	7.85	33.2	0.7	6.4	6640	1140	0.17
		1:3 Inoculo	45.2	36.4	8.22	32.8	0.4	1.3	6560	180	0.03
		1:4 Inoculo	44.5	31.8	8.34	31.6	0.2	1	6320	160	0.03
		1:2 Inoculo	46.3	36.4	8.02	30.2	0.6	2	6040	280	0.05
		1:3 Inoculo	44.8	37.4	7.98	30	0.3	1.3	6000	200	0.03

Tabla 30. (Continuación)

Fecha	Temperatura externa (°C)	Prueba	Temperatura Gas (°C)	Temperatura Mezcla (°C)	pH mezcla	V1 (ml)	V2 (ml)	V3 (ml)	Alcalinidad Total (TAC)	Acidez Volátil (AGV)	AGV/TAC
29/06/2020	37.5	1:4 Inoculo	43.1	33.7	7.92	26.4	0.4	1.2	5280	160	0.03
01/07/2020	37.6	1:2 Inoculo	47.6	35	7.82	33.2	0.4	6.2	6640	1160	0.17
		1:3 Inoculo	45.8	35.8	8.45	36.1	0.3	1.2	7220	180	0.02
		1:4 Inoculo	45	31.9	8.5	33.2	0.1	1	6640	180	0.03
		1:2 Inoculo	45.9	35.7	8.06	30.1	0.6	2.4	6020	360	0.06
		1:3 Inoculo	45.2	37.3	8.07	32.1	0.6	2.1	6420	300	0.05
		1:4 Inoculo	43.3	33.9	8.03	25.2	0.2	1.5	5040	260	0.05
03/07/2020	37.5	1:2 Inoculo	48.2	35.1	7.86	32.8	0.5	4.2	6560	740	0.11
		1:3 Inoculo	46.6	36.2	8.52	32.5	0.3	1.3	6500	200	0.03
		1:4 Inoculo	45.4	32.1	8.61	29.6	0.2	0.9	5920	140	0.02
		1:2 Inoculo	46.2	35.7	8.12	30.2	0.4	2.2	6040	360	0.06
		1:3 Inoculo	45.6	37.8	8.18	32.2	0.2	1.4	6440	240	0.04
		1:4 Inoculo	43.4	34.2	7.92	26.4	0.2	1.1	5280	180	0.03
05/07/2020	37.7	1:2 Inoculo	52	35.2	7.47	26.1	0.3	2.1	5220	360	0.07
		1:3 Inoculo	48.3	36.2	8.62	30.8	0.4	1	6160	120	0.02
		1:4 Inoculo	46.9	32.2	8.76	28.8	0.2	0.8	5760	120	0.02
		1:2 Inoculo	47.8	35.9	8.16	28.3	0.2	0.9	5660	140	0.02
		1:3 Inoculo	48.7	37.9	8.32	32.4	0.3	1.3	6480	200	0.03
		1:4 Inoculo	46.6	34.5	7.92	27.1	0.3	1.2	5420	180	0.03
07/07/2020	37.9	1:2 Inoculo	50.3	35.5	7.86	29.4	0.6	2	5880	280	0.05
		1:3 Inoculo	46.8	37.2	8.54	32.3	0.3	1	6460	140	0.02
		1:4 Inoculo	45.5	32.9	8.76	29.3	0.2	1	5860	160	0.03
		1:2 Inoculo	46.6	36.5	8.07	27.8	0.4	1.5	5560	220	0.04
		1:3 Inoculo	47	37.9	8.15	31	0.4	1.1	6200	140	0.02
		1:4 Inoculo	44.9	34.5	8.09	28.2	0.3	1	5640	140	0.02
09/07/2020	37.8	1:2 Inoculo	49.7	35.6	7.87	29.1	0.5	1.6	5820	220	0.04
		1:3 Inoculo	46.6	37.2	8.65	32.3	0.4	1.2	6460	160	0.02
		1:4 Inoculo	45.6	31.8	8.82	31.7	0.3	1.2	6340	180	0.03
		1:2 Inoculo	46.3	36.6	8.16	28.7	0.2	1.2	5740	200	0.03

Tabla 30. (Continuación)

Fecha	Temperatura externa (°C)	Prueba	Temperatura Gas (°C)	Temperatura Mezcla (°C)	pH mezcla	V1 (ml)	V2 (ml)	V3 (ml)	Alcalinidad Total (TAC)	Acidez Volátil (AGV)	AGV/TAC
09/07/2020	37.8	1:3 Inoculo	46.9	37.9	8.28	29.7	0.3	1.3	5940	200	0.03
		1:4 Inoculo	45.2	34.3	7.96	26.8	0.3	1.1	5360	160	0.03
11/07/2020	37.8	1:2 Inoculo	50.3	35.7	7.91	29.8	0.4	1.8	5960	280	0.05
		1:3 Inoculo	46.7	37.3	8.71	32.7	0.3	1.1	6540	160	0.02
		1:4 Inoculo	45.5	32.5	8.78	30.2	0.2	1	6040	160	0.03
		1:2 Inoculo	46.5	36.6	8.09	28.2	0.5	1.9	5640	280	0.05
		1:3 Inoculo	47	37.9	8.22	30.6	0.3	1.4	6120	220	0.04
		1:4 Inoculo	45.2	34.3	7.94	26.4	0.2	1	5280	160	0.03

Fuente: elaboración propia

ANEXO J

RESULTADOS EXPERIMENTALES PORCENTAJE DE METANO EN EL BIOGAS

Tabla 31. Resultados Experimentales %Metano Experimento Original ETAPA 2

EXPERIMENTO ORIGINAL	Volumen de agua desplazado				Volumen biogás inyectado (ml)	60
Prueba	P1 (ml)	P2 (ml)	P 3 (ml)	Volumen Promedio (ml)	Desviación Estándar (ml)	% prom. Metano
1:2 Inoculo	9.5	11	7	9.17	2.02	15.3
1:3 Inoculo	10.5	5	5	6.83	3.18	11.4
1:4 Inoculo	8	8.5	9	8.5	0.5	14.2

Fuente: elaboración propia

Tabla 32. Resultados Experimentales %Metano Experimento Réplica ETAPA 2

EXPERIMENTO RÉPLICA	Volumen de agua desplazado				Volumen biogás inyectado (ml)	60
Prueba	P1 (ml)	P2 (ml)	P3 (ml)	Volumen Promedio (ml)	Desviación Estándar (ml)	% prom. Metano
1:2 Inoculo	11	10	10.5	10.5	0.5	17.5
1:3 Inoculo	9	9.6	11	9.87	1.03	16.4
1:4 Inoculo	8	9.5	10.5	9.33	1.26	15.6

Fuente: elaboración propia

ANEXO K

CÁLCULO Y RESULTADOS DE CONTENIDO DE METANO

Tabla 33. Coeficientes a,b,c,d de Buswell

	R 1:2			R 1:3			R 1:4		
	Masa total Mezcla	%Componente	Coeficientes a b c d	Masa total Mezcla	%Componente	Coeficientes a b c d	Masa total Mezcla	%Componente	Coeficientes a b c d
C	484.06	0.4401	20.17	363.05	0.4401	15.13	290.44	0.4401	12.10
H	62.62	0.0569	31.31	46.96	0.0569	23.48	37.57	0.0569	18.79
O	385.53	0.3505	12.05	289.15	0.3505	9.04	231.32	0.3505	7.23
N	13.29	0.0121	0.47	9.97	0.0121	0.36	7.97	0.0121	0.28
Otros	154.47	0.1404		115.85	0.1404		92.68	0.1404	

Fuente: elaboración propia