

**DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE DIGESTION ANAEROBIA EN DOS FASES
PARA LA OBTENCION DE BIOGAS MEDIANTE RESIDUOS CITRICOS**

**GABRIELA ESPITIA RINCÓN
NICOLÁS RUIZ PADILLA**

**Proyecto integral de grado para optar al título de
Ingeniería Química**

Director

Harvey Andrés Mílquez Sanabria.

Ingeniero Químico

Msc Ingeniería – Ingeniería Química

PhD Ciencias – Energías Renovables

FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C.

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma director

Firma del Presidente Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C., julio de 2022

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente 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. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrectora Administrativo y Financiero.

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General.

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingeniería.

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director del programa.

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

DEDICATORIA

Inicialmente, Dios es parte esencial en este proceso. Me permitió culminar esta meta y acompañarme durante todo el proceso. Seguidamente, este trabajo de grado se lo dedico con amor a mi familia. En especial a mi mamá y papá, debido a que, gracias a su esfuerzo, trabajo y constancia, hoy puedo culminar este logro que se convierte nuestro. Solo me queda reconocer las grandes personas que son, su apoyo incondicional, sus consejos acertados, su actitud positiva, sus regaños, enseñanzas, entre otros, que sin duda me formaron en la persona que soy. También, me enseñaron que las metas se trabajan todos los días con dedicación y trabajo duro. Por otro lado, mi hermana, mi mayor apoyo. Ella me demuestra su amor, paciencia y motivación, cada día. Me escuchó y me acompañó durante todo este proceso, en especial, ante las dificultades. Igualmente, hacen parte fundamental, mi abuela, tía y prima, ya que, siempre están dispuestas a escucharme, guiarme e impulsarme.

Finalmente, a mis amigos, colegas y profesores. A ellos, por acompañarme durante este proceso lleno de retos, los cuales siempre se demostraba lo capaces que somos, por compartirme su conocimiento, ayudarme en las dificultades, por impulsarme y darme palabras de aliento.

Gabriela Espitia

En primera medida, agradezco a Dios por permitirme llegar hasta esta instancia de mi vida y poder culminar este camino lleno de retos y aprendizajes los cuales finalizan con este proyecto. A mi familia que es el motor principal y la base de apoyo que tengo en todo momento para incentivarme a ser mejor persona y un profesional mucho más íntegro. Dedico este título a mis padres, responsables de darme la vida, la educación y el impulso necesario para conseguir este logro. A mi mamá por su ejemplo de entereza, dedicación, fortaleza, entrega, carácter, pero principalmente por el amor incondicional depositado en mí. A mi papá por brindarme su apoyo, motivación y respaldo durante toda mi vida y carrera universitaria. A mi hermano Santi, quien es mi cómplice, amigo y compañero de vida, y que sin lugar a dudas siempre me demuestra su admiración y leal cariño. A mi abuelito José y abuelita Celia por su ejemplo, soporte y afecto durante toda mi vida. A mi abuelita Anita, que a pesar que no se encuentre ya conmigo en este mundo, siempre estará en mi corazón y este logro es gracias a ella y a todas sus enseñanzas. Finalmente, a todas las personas que han hecho parte y han estado inmersas durante todo este proceso, que han visto mi esfuerzo y me han acompañado en cada paso que he dado, con el fin de culminar una de las metas más importantes de mi vida y con la cual estaré muy orgulloso en un futuro. A mis amigos, colegas y compañeros con los que he compartido anécdotas y experiencias, agradezco infinitamente su amistad y sincero apoyo.

Nicolás Ruiz Padilla

AGRADECIMIENTOS

Durante este proceso, sin duda, hemos afrontado experiencias llenas de retos, dificultades, aprendizajes, felicidad, entre otros, pero detrás de todos estos años de esfuerzo, hay personas que nos ayudaron cada día a que cumplir esta meta. Por ende, queremos agradecer a:

La Fundación Universidad de América, que ha sido nuestro segundo hogar por varios años y fue la institución que nos permitió lograr este sueño de ser profesionales y con la cual nos sentimos muy orgullosos de pertenecer, sintiendo siempre su respaldo y apoyo durante todo el tiempo transcurrido.

Al director de nuestro trabajo de grado, profesor Harvey Andrés Milquez, por brindarnos su conocimiento y ayuda para la realización de este trabajo. Siempre demostró colaboración y empatía para sacar adelante este proyecto.

A todos los profesores, directivos y funcionarios que nos acompañaron durante toda nuestra etapa de formación, gracias a ellos tenemos las bases necesarias para ir construyendo nuestra vida profesional.

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

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	12
INTRODUCCION	13
OBJETIVOS	14
1. DIGESTION ANAEROBIA	15
1.1. Materia prima	15
1.2. Proceso de digestión anaerobia	18
1.3. Primera fase	22
1.3.1. Etapa hidrolítica	23
1.3.2. Etapa fermentativa o acidogénica	24
1.4. Segunda fase	25
1.4.1. Etapa acetogénica	25
1.4.2. Etapa metanogénica.	26
1.5. Factores determinantes en el proceso	28
1.5.1. Temperatura	28
1.5.2. Tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica	30
1.5.3. Intervalos de pH	30
1.5.4. Potencial redox	31
1.5.5. Demanda Química de Oxígeno (DQO)	31
1.6. Tipos de reactores	31
1.6.1. Reactor de tanque agitado continuo (CSTR) sin recirculación	32
1.6.2. Reactor de contacto	33
1.6.3. Reactores de filtros anaeróbicos	34
1.6.4. Reactor de lecho expandido y fluidizado	36
1.6.5. Reactor continuo	37
1.6.6. Reactor semicontinuo	37
1.6.7. Reactor tipo Batch	38
1.7. Otros sistemas	38
1.7.1. Sistema en una fase	38
1.7.2. Sistemas de dos fases	38
1.8. Métodos de cuantificación de metano	40
1.8.1. Método volumétrico	41
1.8.2. Método manométrico	42
1.8.3. Método cromatográfico	43

2.	SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE FRUTAS CÍTRICOS.	44
2.1.	Metodología	44
2.2.	Desarrollo	44
2.2.1.	Sólidos totales	51
2.2.2.	<i>Material volátil</i>	53
2.2.3.	<i>Relación carbono/nitrógeno</i>	54
2.2.4.	<i>Compuestos lignocelulósicos</i>	58
2.2.5.	<i>Ácidos grasos volátiles</i>	60
2.2.6.	<i>Alcalinidad</i>	63
2.2.7.	<i>Humedad</i>	65
2.2.8.	<i>Macronutrientes y micronutrientes</i>	67
3.	CONDICIONES DE OPERACIÓN	72
3.1.	Metodología	72
3.2.	Desarrollo	72
3.2.1.	<i>Tamaño de partícula</i>	74
3.2.2.	<i>Velocidad de carga orgánica</i>	75
3.2.3.	<i>Temperatura</i>	76
3.2.4.	<i>Agitación</i>	78
3.2.5.	<i>Tiempo de retención hidráulico</i>	80
3.2.6.	<i>pH</i>	82
4.	PROPUESTA DE DISEÑO	86
4.1.	Metodología	86
4.2.	Desarrollo	86
4.2.1.	<i>Tanques de almacenamiento y mezcla.</i>	89
4.2.2.	<i>Primer biodigestor</i>	91
4.2.3.	<i>Segundo biodigestor</i>	95
4.2.4.	<i>Válvulas</i>	98
4.2.5.	<i>Bombas</i>	99
4.2.6.	<i>Tuberías</i>	100
4.2.7.	<i>Recolección del gas</i>	100
	CONCLUSIONES	105
	RECOMENDACIONES	107
	BIBLIOGRAFÍA	109
	ANEXOS	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ruta metabólica del proceso de digestión anaerobia.	22
Figura 2. Clasificación de los reactores anaerobios.	32
Figura 3. Reactor de mezcla completa sin recirculación.	33
Figura 4. Reactor de contacto o de mezcla completa con recirculación.	34
Figura 5. Clasificación de los reactores de filtros anaerobios.	35
Figura 6. Representación esquemática de un reactor de lecho expandido fluidizado.	37
Figura 7. Comparación de la digestión anaerobia en una o dos fases.	39
Figura 8. Configuración básica, ventajas y desventajas del método volumétrico.	41
Figura 9. Configuración básica, ventajas y desventajas del método manométrico.	42
Figura 10. Configuración básica, ventajas y desventajas del método cromatográfico.	43
Figura 11. Residuos de cascara de limón, mandarina y naranja, respectivamente.	50
Figura 12. Sólidos totales de la mezcla de residuos.	52
Figura 13. Estructura de biomasa lignocelulósica.	58
Figura 14. Diagrama de flujo del proceso.	88
Figura 15. Modelo de tanque de almacenamiento y mezcla.	90
Figura 16. Modelo propuesto del primer biodigestor.	95
Figura 17. Modelo propuesto para el segundo biodigestor.	98
Figura 18. Estequiometría del biogás.	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Residuos orgánicos de diversos orígenes.	15
Tabla 2. Área, producción y rendimiento de la cadena cítrica en Colombia.	16
Tabla 3. Precios nacionales de referencia reportados en la Central Mayorista de Abastos en COP/lb.	17
Tabla 4. Consumo aparente de cítricos en Colombia.	17
Tabla 5. Perspectiva de la digestión anaerobia en dos fases.	19
Tabla 6. Intervalos de Temperaturas y Tiempo de fermentación anaeróbica.	29
Tabla 7. Parámetros y porcentajes de la matriz de selección.	46
Tabla 8. Criterios de evaluación dependiendo del parámetro asignado.	47
Tabla 9. Matriz de selección.	47
Tabla 10. Residuos producidos en kg durante el primer semestre de 2020.	48
Tabla 11. Resultados de las características fisicoquímicas experimentales.	51
Tabla 12. Material volátil teórico para los residuos.	53
Tabla 13. Relación carbono/nitrógeno teórico.	55
Tabla 14. Relación carbono/nitrógeno de diferentes excretas.	56
Tabla 15. Porcentaje de lignina, celulosa y hemicelulosa teórico.	59
Tabla 16. Parámetros teóricos de los ácidos grasos volátiles.	61
Tabla 17. Intervalos operacionales propuestos por varios autores para la alcalinidad.	64
Tabla 18. Porcentaje teórico de humedad.	65
Tabla 19. Parámetros teóricos de los micronutrientes y macronutrientes.	68
Tabla 20. Componentes necesarios para el proceso de digestión anaerobia.	70
Tabla 21. Micronutrientes y macronutrientes teóricos necesarios para la digestión anaerobia.	70
Tabla 22. Concentraciones inhibitorias de ciertas sustancias en un proceso anaeróbico.	71
Tabla 23. Comparación de sistemas de digestión anaerobia en dos fases.	73
Tabla 24. Desventajas del proceso de digestión anaerobia al trabajarse en rangos termófilos de temperatura.	77
Tabla 25. Intervalos de temperatura de operación.	78
Tabla 26. Tipos de agitación más comunes.	79
Tabla 27. Intervalos de pH de operación.	83
Tabla 28. Recopilación de los volúmenes netos teóricos para el primer biodigestor.	94
Tabla 29. Recopilación de los volúmenes netos teórico para el segundo biodigestor.	97
Tabla 30. Valores teóricos de los coeficientes.	102
Tabla 31. Datos teóricos obtenidos de biogás y su composición.	103
Tabla 32. Recopilación de los datos teóricos de cada elemento.	123
Tabla 33. Peso de cada elemento.	125

RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene como finalidad presentar y proponer una alternativa amigable y eficiente para el aprovechamiento de residuos orgánicos, específicamente para las cáscaras de fruta (naranja, mandarina y limón) que hoy en día representan un auge mundial por su disposición final y el mal aprovechamiento que se les está dando al ser desperdiciadas y eliminadas de manera inadecuada. Se evaluó la generación de un tipo de energía renovable como lo es el biogás, el cual a partir de la síntesis y degradación de la materia orgánica es producido como producto del mecanismo alterno del metabolismo bacteriano. Inicialmente, se planteó una búsqueda de conceptos y principios sobre la producción de biogás, resaltando conceptos de su composición, propiedades, etapas que comprenden el proceso, factores determinantes, y a su vez, una revisión bibliográfica entorno a las tecnologías de digestores y de los métodos de cuantificación de metano.

Seguido de esto, a partir de una matriz de selección se estableció la composición de residuos a emplear, en la cual se evaluaron aspectos operativos del proceso como lo son la disponibilidad del residuo, su rendimiento global y sus características fisicoquímicas experimentales y teóricas. Allí se determinó la proporción de residuos a utilizar, distribuidos bajo la carga inicial de materia orgánica que se empleó la cual fue de 8.6 kg. Del mismo modo, se estableció una relación 1:1 sustrato/agua y 1:2 sustrato/excretas.

Posteriormente, teniendo ya consolidada la composición de las mezclas y las condiciones óptimas de operación para cada etapa del proceso, se procedió a proponer el esquema completo y la propuesta de diseño para el sistema, en donde a partir de la revisión bibliográfica de diversos artículos se propuso el mejor dimensionamiento para el proceso.

Finalmente, para la evaluación del biogás obtenido en el sistema de recolección y cuantificación, se propuso el método volumétrico para la determinación de la concentración de metano. A su vez, se calculó el potencial bioquímico teórico de metano mediante la ecuación de Buswell para la carga orgánica establecida. Dando como resultado una producción teórica de biogás de 0.87 m³/kg, 0.52 m³/kg de metano y 0.35 m³/kg de dióxido de carbono, planteado a partir de un diseño a escala laboratorio para procesar la cantidad predeterminada de sustrato junto con 4.3 kg de excretas bovinas.

Palabras claves: Biodigestor, proceso biológico, microorganismos, sustrato, codigestión

INTRODUCCION

Uno de los problemas que genera gran auge es la disposición final de los residuos sólidos de alimentos que son generados en la producción, distribución y comercialización. En Colombia, según estadísticas del Departamento Nacional de Planeación (DNP), anualmente se pierden y desperdician 9.76 millones de toneladas de alimentos, lo que equivale al 34% de la producción total. Las mayores pérdidas se registran con un 62% en las cadenas de frutas y vegetales [1].

Mediante la caracterización de los residuos cítricos se pueden determinar los factores importantes para lograr llevar a cabo la digestión anaeróbica y de igual forma, proporcionar los factores de operación óptimos para su funcionamiento. El proceso anaeróbico se efectúa mediante una secuenciación progresiva de reacciones, las cuales dan lugar a la producción de un gas con un alto contenido energético (biogás) que se compone primordialmente por metano y dióxido de carbono. El biogás producido es recolectado y empleado como fuente de combustible y electricidad. Lo cual lleva a una tendencia mundial que pretende el fortalecimiento de la conciencia ambiental, por medio de una búsqueda permanente de mecanismos, estrategias y tecnologías capaces de mitigar la pérdida acelerada de los recursos como alternativa de solución al agotamiento de estos.

Bajo la óptica global del desarrollo biotecnológico, el proceso de digestión anaerobia busca dar cumplimiento a tres objetivos claves: a) Enriquecer las inspecciones sanitarias a partir del control de la contaminación, previniendo la acumulación de residuos orgánicos; b) Producción de energías renovables enfocadas a distintas actividades, ya que mediante la digestión anaerobia, el biogás puede ser utilizado en diversas áreas; y c) Proporcionar materiales estabilizados como lo es el bioabono, ya puede ser usado como biofertilizante para cultivos y es un subproducto generado [2].

Por otra parte, el presente proyecto investigativo busca encaminarse a una economía circular logrando mantener un valor de los productos y materiales durante el mayor tiempo posible en el ciclo productivo, disminuyendo los residuos y el uso de recursos. Además, es vital su conservación dentro de la economía cuando un producto culmina la etapa de su vida útil, con el fin de reutilizarlos frecuentemente y seguir agregándoles valor. Los recursos se restablecen dentro del ciclo biológico a partir de diversos procesos (digestión anaeróbica, biogás, compostaje) logrando reutilizar los materiales desechados, pese a la intervención humana o sin que esta sea necesaria [3].

OBJETIVOS

Objetivo general

- Desarrollar una propuesta de digestión anaerobia en dos fases para la obtención de biogás mediante los residuos cítricos.

Objetivos específicos

- Determinar las características fisicoquímicas que tienen los residuos de frutas cítricas para la obtención de biogás.
- Seleccionar las condiciones de operación adecuadas para los reactores en el proceso de obtención de biogás.
- Realizar una propuesta de diseño para el proceso de digestión anaerobia de los residuos de frutas cítricas.

1. DIGESTION ANAEROBIA

1.1. Materia prima

Se establecen todas las materias primas capaces de generar una actividad metanogénica, las cuales incluyen dentro de un amplio espectro todos los residuos orgánicos de origen animal, vegetal, doméstico, agroindustrial y forestal. Analizando factores claves relacionados principalmente a las características bioquímicas que presentan estos, con el fin de permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico. La actividad metabólica en sus requerimientos, no solamente se restringe a fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también debe existir en el medio un equilibrio de sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores) [2].

A continuación, en la tabla 1 se pueden observar la variedad de residuos orgánicos existentes dependiendo de su origen y/o procedencia.

Tabla 1.

Residuos orgánicos de diversos orígenes.

Residuos de origen animal	estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados.
Residuos de origen vegetal	malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado.
Residuos de origen humano	heces, basura, orina.
Residuos agroindustriales	salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas.
Residuos forestales	hojas, vástagos, ramas y cortezas.
Residuos de cultivos acuáticos	algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.

Nota. La tabla muestra los diversos residuos orgánicos dependiendo del origen. Tomada de: M. T. Varnero, “Manual del biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Santiago de Chile, Chile.” 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>. [Último acceso: 28 Marzo 2022].

Esta investigación tiene como finalidad presentar la digestión anaerobia de los residuos cítricos, pero más específicamente el caso de la naranja, mandarina y limón. Teniendo en cuenta las cifras generales de la cadena de cítricos, expuesta en la tabla 2. Se evidencia un aumento en la producción y en su rendimiento. Además, se constata que en los principales centros mayoristas y de acopio del país, el 47% de la producción corresponde a naranjas, el 27% a mandarinas y el 26% a limón, catalogándose como el productor cítrico con la mayor tasa de crecimiento en términos del área cosechada y con mayor proyección de exportación [4].

Tabla 2.

Área, producción y rendimiento de la cadena cítrica en Colombia.

NACIONAL	2015	2016	2017	2018	2019
Área Sembrada (Ha.)	90.505	93.078	96.435	99.914	97.007
Área Cosechada (Ha.)	76.272	80.073	83.239	84.293	84.147
Producción (Ton)	1.124.197	1.249.660	1.290.567	1.332.814	1.257.474
Rendimiento (Ton/Ha)	14,7	15,6	15,5	15,4	15,2

Nota. La tabla muestra el área, producción y rendimiento de la cadena cítrica en Colombia. Tomada de: MINAGRICULTURA, “Cadena del cítrico. Indicadores e instrumentos. Indicadores de cadenas agrícolas y forestales,” junio 2019. [En línea]. Disponible en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/2019-06-0%20Cifras%20Sectoriales.pdf> [Último acceso: 23 Marzo 2022].

La caracterización y disponibilidad de materias primas se rigen bajo los precios de referencia utilizados comercialmente. En la tabla 3 se ven reflejados los precios de las materias primas que se utilizarán en el presente trabajo, discretizado por las variedades más comunes para cada especie.

Tabla 3.

Precios nacionales de referencia reportados en la Central Mayorista de Abastos en COP/lb.

PRODUCTO	VARIEDAD	2015	2016	2017	2018	2019*
Limón	Común	1.226	1.177	1.309	1.427	1.420
	Tahití	1.484	1.686	1.878	2.049	1.537
Mandarina	Oneco	1.804	1.919	2.099	2.469	2.370
	Arrayana	2.017	2.153	2.369	2.174	2.353
Naranja	Sweety	857	820	950	1.085	851
	Valencia	989	984	1.000	1.029	853

Nota. La tabla evidencia los precios de referencia para los cítricos reportados en la Central Mayorista de Abastos. Tomada de: MINAGRICULTURA, “Cadena del cítrico. Indicadores e instrumentos. Indicadores de cadenas agrícolas y forestales,” junio 2019. [En línea]. Disponible en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/2019-06-0%20Cifras%20Sectoriales.pdf> [Último acceso: 23 Marzo 2022].

Por otra parte, la representación de la materia prima se puede cuantificar a partir del consumo aparente del mismo, el cual se puede observar en la tabla 4, donde la naranja representa la mayor parte de producción. De igual forma, las frutas cítricas muestran un aumento significativo cada año.

Tabla 4.

Consumo aparente de cítricos en Colombia.

CONSUMO CÍTRICOS	2015	2016	2017	2018	2019*
Nacional (Ton)	1.111.074	1.124.197	1.249.660	1.290.567	1.332.814
Importado (Ton)	1.346	1.750	2.843	963	146
Exportaciones (Ton)	17.937	6.262	17.547	35.003	6.780
Total Consumo Aparente	1.094.483	1.119.685	1.234.956	1.256.527	1.326.180
Población	47.661.787	48.203.405	48.650.000	48.650.000	50.000.000
Consumo Percapita (Kg.)	23	23	25	26	27

Nota. La tabla muestra el consumo aparente de cítricos en Colombia. Tomada de: MINAGRICULTURA, “Cadena del cítrico. Indicadores e instrumentos. Indicadores de cadenas agrícolas y forestales,” junio 2019. [En línea]. Disponible en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/2019-06-0%20Cifras%20Sectoriales.pdf> [Último acceso: 27 Marzo 2022].

1.2. Proceso de digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia es catalogado como la degradación y descomposición de la materia biológica presente en el residuo, la cual en ausencia de oxígeno y a partir de la actividad de microorganismos específicos lo transforma en un gas con un elevado contenido energético que se denomina como biogás y también en otros subproductos que poseen la mayor cantidad de componentes minerales y compuestos conocidos como lodos, los cuales son de difícil degradación [5].

La materia prima preferentemente utilizada para ser sometida a este tratamiento es cualquier biomasa residual la cual se descompone en compuestos más sencillos, que son transformados en ácidos grasos volátiles, actuando como los principales intermediarios y moduladores del proceso. Estos ácidos son consumidos por los microorganismos metanogénicos que producen una mezcla con un contenido de metano del 50% al 70% y de dióxido de carbono que oscila entre el 30% al 50%, con pequeñas trazas de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno) [6].

Actualmente, se establece y se tiene el ideal que la digestión anaerobia es el camino hacia el desarrollo sostenible y renovable. Esta tecnología es de fácil adquisición y a un futuro, muy prometedor. El artículo señalado en la tabla 5, se basa en una revisión de parámetros que deben ser monitoreados y controlados para lograr un proceso de digestión anaerobia eficiente con un alto porcentaje de rendimiento. También, describe y analiza la perspectiva actual de la digestión anaerobia en dos etapas [7].

Tabla 5.

Perspectiva de la digestión anaerobia en dos fases.

1. Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review.		
Métodos de pretratamiento para la hidrólisis de residuos alimentarios.	Proceso de una fase frente a proceso de dos fases	Desafíos actuales y direcciones futuras
<p>Los sustratos utilizados en los procesos de digestión anaerobia, necesitan algún método de pretratamiento debido a que es una estrategia potencial para aumentar la biodegradabilidad de los compuestos orgánicos. De igual manera, se disminuye el porcentaje de compuestos lignocelulósicos. Se han utilizado diferentes métodos de pretratamiento para acelerar la hidrólisis. Algunos son:</p> <p>1. Los pretratamientos físicos se centran principalmente en la reducción del tamaño de las partículas y también en la alteración de la estructura morfológica, aumentando la solubilidad. Se evidencia que un 53% de los residuos alimentarios, aumentó la producción de metano en un 28%. Sin embargo, la reducción excesiva del tamaño de partícula disminuye considerablemente la tasa de producción de biogás.</p> <p>2. La ultrasonificación rompe mecánicamente la membrana celular de los desechos orgánicos y reduce la complejidad de la molécula orgánica, aumentando así su solubilidad y accesibilidad para la bioconversión. En el caso de dos</p>	<p>El proceso de digestión anaerobia genera diferencias positivas y negativas, si se desarrolla en una o dos fases. El proceso de dos fases apoya el crecimiento y el rendimiento de una mayor diversidad de arqueas que un proceso de una sola fase, debido a que las arqueas metanogénicas aumentan hasta cinco veces más, lo que promueve la tasa de producción de metano. La producción específica de biogás en el sistema de dos fases es más alta que en el sistema de una sola fase. El rendimiento de biometano en el sistema de dos fases fue un 10,8% más alto que el sistema de una sola fase. Por otro lado, la etapa de acidificación generalmente se opera con baja retención hidráulica, ya que es un proceso rápido y funciona mejor a un pH de 5,0 a 6,0. La etapa metanogénica se opera con un tiempo de retención hidráulica comparativamente más alto, generalmente de 20 a 30 días, lo que facilita la proliferación de</p>	<p>La digestión anaeróbica en dos fases, aunque permite una mayor eficiencia, se asocia con algunas deficiencias y desafíos, como mantener la estabilidad del proceso a tasas de carga orgánica, la separación de dos fases y el mantenimiento de parámetros más altos específicos del proceso para cada fase. En un sistema de digestión anaerobia de dos fases, las técnicas de pretratamiento para la hidrólisis pueden afectar el rendimiento del primer reactor. La separación de la hidrólisis como una etapa distinta puede ayudar a mejorar la eficiencia y reducir los factores inhibidores. También, puede operar a temperaturas y pH extremos para mejorar la eficiencia, pero influye en costos energéticos y de equipos. La digestión anaerobia de dos fases enfrenta el desafío de los ácidos grasos volátiles, ya que no</p>

<p>fases, el rendimiento de metano aumentó aún más a 1,58 veces.</p> <p>3. Los pretratamientos térmicos aumentan el área superficial de los sustratos, aumentando así el nivel de contacto entre el sustrato y la comunidad microbiana. La temperatura recomendada es bajas, 70°C–80°C, dado que es más económico y eficiente de los residuos de alimentos.</p> <p>4. Los pretratamientos alcalinos son más adecuados para los desechos lignocelulósicos ya que son efectivos para solubilizar el contenido de lignina. Además, el contenido de álcali residual ayuda a compensar la reducción del pH durante la etapa de acidogénesis, haciéndolo más compatible y efectivo.</p> <p>5. La aplicación de enzimas hidrolíticas es otra técnica de pretratamiento altamente eficiente debido a la alta recuperación de energía. Aunque, aseguran una mayor producción de biogás, enfrenta limitaciones económicas a escala comercial que podrían verse abrumadas por la tecnología de producción de enzimas in situ específicas del sustrato.</p>	<p>de metanógenos de crecimiento lento y un pH de 6,0 a 8,0 es más favorable para esta etapa.</p> <p>La digestión anaerobia en dos fases es una técnica prometedora para mejorar la estabilidad y la producción de metano del reactor que trata sustratos altamente biodegradables a mayor tasa de carga orgánica.</p>	<p>favorece al proceso los AGV de cadena larga, pero si son beneficiosos los AGV de cadena corta.</p> <p>El lapso de tiempo entre la acidogénesis y la metanogénesis es un factor importante, decide la eficacia de la digestión anaerobia de dos fases ya que el tiempo de retención hidráulica de la etapa acidogénica es más corta en comparación con la de la metanogénesis.</p> <p>Finalmente, la codigestión de sustratos suele ser una alternativa viable para suministrar y adoptar el proceso y lograr superar el desequilibrio de nutrientes en el reactor.</p>
---	--	---

Nota. La tabla presenta la perspectiva de diversos autores entorno al proceso de digestión anaerobia en dos fases. Información extraída de: Srisowmeya G., Chakravarthy M., Nandhini G. “Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review”, noviembre 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109587> [Último acceso: 10 Marzo 2022].

La incidencia de los microorganismos metanogénicos y las bacterias no metanogénicas en el proceso anaeróbico es clave, ya que cumplen la función de actuar como enzimas respiratorias y representan un sistema alimentario que va alineado con los parámetros enzimáticos de las cadenas celulares aeróbicas. De este modo, los residuos orgánicos son transformados en su totalidad en

biogás, el cual será un efluente del sistema. Dependiendo el tipo de aceptores del sistema, el proceso de digestión anaerobia se puede clasificar como fermentación anaeróbica o respiración anaeróbica [2].

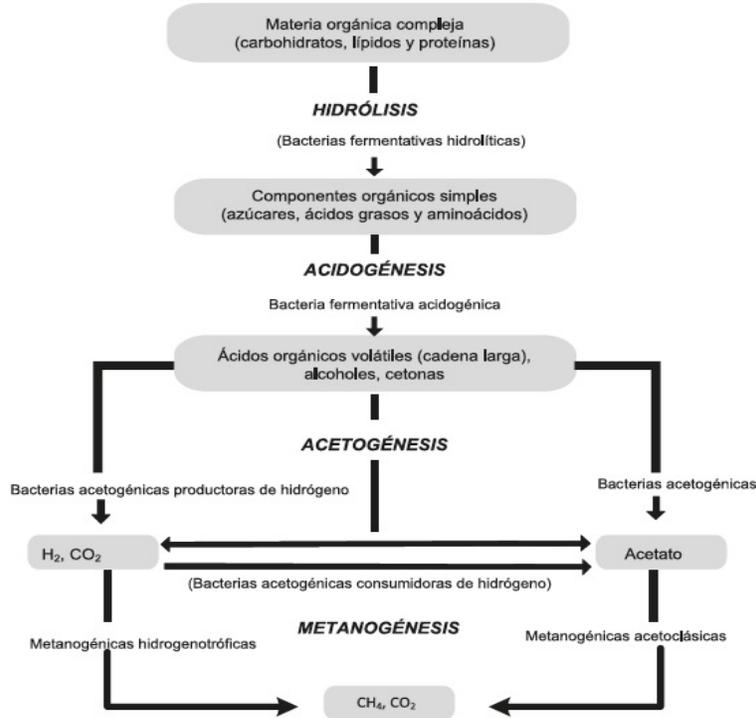
- Fermentación anaeróbica: En este punto la materia orgánica se cataboliza en ausencia de un aceptor de electrones externo a partir microorganismos anaeróbicos estrictos o facultativos mediante reacciones de oxidación-reducción. El resultado de este proceso es la aceptación de electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica, es decir, que dicha materia actúa como donador y receptor de electrones al mismo tiempo, conservando tan solo una mínima cantidad de la energía contenida en el sustrato [2].
- Respiración anaeróbica: La respiración anaeróbica es catalogada como un proceso biológico de óxido-reducción de monosacáridos y otros compuestos en el que el aceptor terminal de electrones es una molécula inorgánica distinta del oxígeno, y más raramente una molécula orgánica. Esto es efectuado únicamente por algunos grupos de bacterias y para ello requieren de una cadena transportadora de electrones análoga a la de las mitocondrias en la respiración aeróbica, en donde es indispensable no confundirlo con el término de fermentación, ya que este es un proceso también anaeróbico, pero en el cual no participa una cadena transportadora de electrones y el aceptor final de electrones es siempre una molécula orgánica [2].

El proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo a través de cuatro etapas sucesivas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. El proceso depende de las interacciones entre los diversos microorganismos que son capaces de llevar a cabo las cuatro etapas antes mencionadas [8]. La primera es una hidrólisis, en donde las bacterias fermentativas hidrolíticas son la población bacteriana encargada del proceso. Seguido de esto, se presenta la acidogénesis la cual es intermediada por las bacterias fermentativas acidogénicas. Posteriormente, sigue la acetogénesis en donde las bacterias acetogénicas productoras y consumidoras de hidrógeno actúan como intercesoras. Por último, la metanogénesis está mediada por bacterias metanogénicas hidrogenotróficas y acetoclásicas [9].

La ruta metabólica expresada anteriormente, se puede observar ilustrativamente en la figura 1 donde se evidencia el ciclo o proceso que se lleva a cabo en la el digestión anaerobia.

Figura 1.

Ruta metabólica del proceso de digestión anaerobia



Nota. La imagen muestra la ruta metabólica del proceso de digestión anaerobia. Tomada de: M. T. Varnero, “Manual del biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Santiago de Chile, Chile.” 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>. [Último acceso: 28 Marzo 2022].

La digestión anaerobia se puede desarrollar convencionalmente en un reactor donde ocurren generalmente las 4 etapas simultáneamente. Sin embargo, la digestión anaerobia también se puede desarrollar en dos fases, donde las dos primeras etapas (hidrólisis y acidogénesis) se efectúan en el primer reactor y las dos etapas posteriores (acetogénesis y metanogénesis) se desarrollan en un segundo reactor:

1.3. Primera fase

En esta fase inicia el proceso de digestión anaerobia, se desarrolla en el primer reactor y en él se efectúan las dos primeras etapas del proceso, es decir las etapas hidrolítica y acidogénica:

1.3.1. Etapa hidrolítica

Los microorganismos presentes en esta etapa del proceso, corresponden a bacterias anaeróbicas facultativas. Los digestores anaerobios suelen encontrar biomasa orgánica que contiene polímeros complejos que son inaccesibles para los microorganismos sin que se descompongan aún más por medio de hidrólisis o pretratamientos mediante reacciones de oxidación-reducción, por enzimas extracelulares producidos por los organismos fermentativos. Como resultado, el proceso de hidrólisis secreta enzimas extracelulares, las cuales sirven para convertir macromoléculas, tales como carbohidratos, lípidos y proteínas, en componentes más pequeños, como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena corta. Después de la escisión enzimática, los productos de la hidrólisis pueden difundirse a través de las membranas celulares de los microorganismos acidogénicos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que ciertos sustratos, como la lignina, la celulosa y la hemicelulosa, pueden resultar difíciles de degradar y pueden ser inaccesibles para los microbios debido a sus estructuras complejas; a menudo se agregan enzimas para mejorar la hidrólisis de estos carbohidratos [8].

La hidrólisis puede existir como un proceso electroquímico, pero en la digestión anaeróbica, existe principalmente como un proceso biológico. Los microorganismos presentes en esta etapa son bacterias anaerobias estrictas como *Bacteroides*, *Clostridium* y bacterias facultativas como *Streptococci*. Este grupo de bacterias esencialmente están encargadas de producir las exoenzimas o hidrolasas que serán utilizadas para degradar la materia orgánica polimérica y convertirla en compuestos monoméricos simples y emplearlos como fuente de materia y energía presente en la degradación anaeróbica de los sustratos orgánicos [10].

Por otra parte, la velocidad global del proceso es regida por la etapa hidrolítica en especial cuando hay una elevada carga de sólidos a tratar en los residuos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de NH_4 y de la concentración de los productos de la hidrólisis [2]. En términos generales, la hidrólisis tiene, por sí sola, una temperatura óptima entre 30 y 50 °C y

un pH óptimo de 5 a 7, aunque no hay evidencia de una actividad hidrolítica mejorada por debajo de un pH de 7 [8].

1.3.2. Etapa fermentativa o acidogénica

Al absorber los productos de la hidrólisis a través de sus membranas celulares, los microorganismos acidogénicos pueden producir ácidos grasos volátiles intermedios (AGV) y otros productos. Los AGV constituyen una clase de ácidos orgánicos como los acetatos y ácidos orgánicos más grandes como el propionato y el butirato, normalmente en una proporción que varía de 75:15:10 a 40:40:20. Incluso pueden estar presentes cantidades más pequeñas de etanol y lactato [8].

El proceso acidogénico llevado a cabo en esta etapa implica la fermentación de compuestos que se emplean directamente por las bacterias metanogénicas del sistema, entre ellas se destacan todas las moléculas orgánicas solubles que tienen la particularidad de ser oxidadas por bacterias acetogénicas en etapas posteriores. La importancia de este grupo de bacterias radica no solo en el hecho de que son la base productora alimentaria para el posterior desarrollo de otros microorganismos, sino, que son capaces de suprimir posibles trazas de oxígeno disuelto a lo largo del sistema anaeróbico. Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias anaerobias facultativas y obligatorias, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos y las cuales pueden tolerar la presencia de concentraciones de oxígeno, es decir son capaces de efectuar todo su proceso metabólico en la presencia o ausencia de O₂ [2].

Cabe resaltar que, durante esta etapa del proceso la microaerofilia es una condición que puede darse a lo largo de la fermentación biológica del sustrato orgánico en el caldo de cultivo debido a la categorización de las bacterias facultativas presentes, es decir que hay inmersas condiciones de baja y estricta concentración de oxígeno que pueden requerir determinados microorganismos para su desarrollo. Las condiciones operativas internas del entorno que debe poseer el sistema para llevar a cabo esta etapa del proceso, serán descritas en el capítulo de la propuesta de diseño en lo relacionado a la operación del primer reactor.

En comparación a otras etapas, por lo regular se establece que la etapa acidogénica posee una cadencia superior que todas las demás etapas de la digestión anaeróbica, y las bacterias acidogénicas tienen un tiempo de regeneración de menos de 36 h. Teniendo en cuenta la rapidez de esta etapa, es importante tener en cuenta que, si bien la producción de AGV crea precursores directos para la etapa final de la metanogénesis, se informa ampliamente que la acidificación de AGV es una causa de falla del digestor A su vez, en esta etapa se pueden citar bacterias acidogénicas de los géneros *Clostridium*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Micrococcus* y *Ruminococcus*, las cuales se deben favorecer en esta etapa del proceso. [8].

1.4. Segunda fase

El proceso se lleva a cabo en el segundo reactor y marca la fase final del proceso de digestión anaerobia. Aquí se efectúan las etapas acetogénica y metanogénica del sistema como se observa a continuación:

1.4.1. Etapa acetogénica

Con la producción de acetato a través de la acidogénesis, una parte del sustrato original ya se convirtió en un sustrato adecuado para la metanogénesis acetoclástica. Sin embargo, otros AGV más altos producidos aún no se han puesto a disposición de los microorganismos metanogénicos. La acetogénesis es el proceso mediante el cual estos AGV superiores y otros intermediarios se convierten en acetato, y también se produce hidrógeno [8]. Sin embargo, los otros productos, por ejemplo, ácidos grasos volátiles, etanol y ciertos agregados aromáticos, deberán ser modificados en productos más simples mediante bacterias acetogénicas, algunas de ellas son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolinii*, las cuales son bacterias anaerobias obligatorias [2].

Por otra parte, cuando las hexosas (azúcares de seis carbonos) son sintetizadas únicamente en acetato, la reacción fermentativa se denomina homoacetogénesis. Estas son bacterias estrictamente anaerobias o llamadas también como obligatorias, las cuales no requieren de oxígeno para su desarrollo y/o metabolismo y se debe garantizar un entorno totalmente anóxico, donde el sistema de aireación garantice una hermeticidad total en términos de ingreso de O₂ ya que este resulta ser

tóxico para las bacterias, la concentración de oxígeno debe ser inferior al 0.5%. Los géneros más representativos en digestores anaerobios para esta etapa y los cuales se debe favorecer son *Clostridium*, *Acetoanaerobium*, *Acetobacterium*, *Acetogenium*, *Butyribacterium*, *Paleobacter*, *Treponema* y *Halophaga*. Existe otro tipo de bacterias acetógenas que se caracterizan por la producción obligada de H₂ y por su participación en la degradación de compuestos aromáticos [5].

De igual manera, los microorganismos presentes en esta etapa se llaman homoacetogénicos, es un tipo de bacteria capaz de desarrollarse de manera heterotrófica cuando existe una presencia de azúcares o compuestos monocarbonados como mezcla H₂/CO₂ y los cuales producen como único producto el acetato. Aquí los productos que no se pueden metabolizar directamente en esta etapa (ácidos grasos volátiles, etanol y ciertos compuestos aromáticos), son oxidados en compuestos más sencillos como es el caso del acetato e hidrógeno con el fin de facilitar el proceso digestivo. Un factor importante de estas bacterias acetogénicas es que consumen como sustrato el hidrógeno más no, lo producen [2]. Si bien la acetogénesis es productora de hidrógeno, una presión parcial excesiva resulta perjudicial para los microorganismos acetogénicos. Sin embargo, debido a la presencia de metanógenos hidrogenotróficos, el hidrógeno puede consumirse rápidamente mientras se mantienen las presiones parciales de hidrógeno a un nivel favorable para la acetogénesis mediante la creación de una reacción exérgica [8].

Al mismo tiempo, los lípidos se someten a una vía separada de acetogénesis a través de la acidogénesis y la β-oxidación, donde la acidogénesis produce acetato a partir de glicerol y la β-oxidación produce acetato a partir de LCFA. Solo los LCFA con una cantidad uniforme de carbono pueden degradarse a acetato; Los LCFA con una cantidad impar de carbonos se degradan primero a propionato [8].

1.4.2. Etapa metanogénica.

La metanogénesis marca la etapa final de la digestión anaeróbica, en la que los microorganismos metanogénicos consumen los intermediarios accesibles para producir metano. Los microorganismos metanogénicos representan un grupo de Archaeas anaerobias obligadas [8]. Los organismos metanogénicos pertenecen y son clasificados bajo el dominio de Archaea, y, son caracterizados por ser bacilos cortos y largos y poseer células en forma de placas y metanógenos filamentosos, tanto Gram positivos como Gram negativos. La clasificación de las Archaeas

metanogénicas utilizadoras de hidrógeno se compone de seis géneros principales, las cuales se deben favorecer y a su vez garantizar un sistema totalmente anóxico ya que en esta etapa del proceso no se toleran elevadas concentraciones de oxígeno ya que causarían la total inhibición de los microorganismos metanogénicos por la toxicidad provocada hacia ellos, al igual que la etapa anterior se deben proveer concentraciones de oxígeno inferiores al 0.5%. Las bacterias más destacadas en esta etapa y que sin lugar a dudas se deben favorecer son: *Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Methanococcus*, *Methanobacillus*, *Methanotrix*, *Methanospirillum* [5].

Con respecto a las necesidades ambientales de la metanogénesis, los microorganismos metanogénicos suelen necesitar un pH más alto que las etapas previas de la digestión anaeróbica, además de un potencial redox más bajo. Al mismo tiempo, los metanógenos parecen tener un tiempo de regeneración significativamente más lento que otros microorganismos en la digestión anaerobia, más de 5 a 16 días [8].

En esta etapa ocurre la metabolización bacteriana del ácido acético y del ácido fórmico, los cuales son degradados en metano y dióxido de carbono respectivamente. A su vez, ocurre la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno. En esta etapa es indispensable resaltar que la transformación del ácido acético a CH₄ corresponde la vía principal de obtención de metano a lo largo de todo el proceso, representado alrededor de un 70% del total de metano que se produce en todo el sistema anaeróbico.

Las reacciones identificadas para estos microorganismos son:

- Conversión de acetato en metano por las Archaeas metanogénicas acetoclásticas: para este caso los productos de interés a obtener son metano y dióxido de carbono, regidos por la reacción acetoclástica la cual es fomentada por los géneros *Methanosarcina* y *Methanotrix*. En este caso, el acetato se rompe por el mecanismo de descarboxilación y el grupo metilo de la molécula es reducido a CH₄ y CO₂ sin alterar su estructura morfológica y tampoco la concentración de hidrógeno presente en el gas. Usualmente, los microorganismos establecidos controlan el pH del medio debido a la supresión del acético y producción de CO₂ que se diluye formando bicarbonato. Gran parte de los microorganismos metanogénicos tienen la facultad de usar el H₂ como medio aceptor de electrones [5].

- Formación de metano a partir del CO₂ y H₂ por las archaeas homoacetogénicas: El control del potencial redox presenciado en la etapa fermentativa en el interior del biodigestor es controlado por la reacción de formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno lo cual en gran medida evita la pérdida de H₂ y CO₂ en el sistema durante el desarrollo sobre compuestos multicarbonados, implicando un mayor rendimiento de la eficiencia termodinámica del medio [5].

Además de la sensibilidad al oxígeno, los microorganismos metanogénicos están confinados a una pequeña selección de sustratos. Por lo general, la metanogénesis acetoclástica a partir de acetato representa aproximadamente $\frac{2}{3}$ de la producción de metano, y la metanogénesis hidrogenotrófica representa aproximadamente el $\frac{1}{3}$ restante de la producción de metano [8].

1.5. Factores determinantes en el proceso

Es indispensable resaltar la incidencia que tienen algunos factores que regulan y gobiernan el proceso metanogénico para la obtención de biogás, especialmente los microorganismos metanogénicos los cuales son altamente susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales. Es por esto, que todo lo relacionado a la biotecnología anaeróbica debe ser cuidadosamente monitoreada en términos de las condiciones ambientales, en las que se destacan, temperatura (mesofílica o termofílica), tipo de materias primas, nutrientes y concentración de minerales traza, pH (generalmente cercano a la neutralidad), condiciones redox óptimas y toxicidad.

1.5.1. Temperatura

La incidencia de la temperatura es determinante en los procesos anaeróbicos debido a que la velocidad de reacción de los mecanismos biológicos depende directamente de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados, que a su vez dependen de la temperatura, es decir que este es un factor clave en la actividad enzimática, en las características del sustrato y el crecimiento microbiano. Es por esto que a medida que se incrementa la temperatura, la velocidad de crecimiento de los microorganismos aumenta y por ende se acelera el proceso de digestión, dando como resultado mayores producciones de biogás. Cabe resaltar que existen tres intervalos de temperatura en los cuales se puede llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia y por ende el crecimiento de los microorganismos. El primero es la fermentación psicrófila (por debajo de

25°C), en segundo lugar, se encuentra la fermentación mesófila (entre 25 y 45°C) y por último la termófila (entre 45 y 65°C). Estos parámetros son factores esenciales que se deben tener en cuenta al momento de establecer la temperatura de operación del biodigestor y como base del diseño operativo, ya que debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica, las variaciones súbitas de temperatura en el biodigestor pueden desestabilizar en gran medida el proceso, es por esto que se debe garantizar una temperatura homogénea en el digestor para evitar problemas asociados a perturbaciones operacionales y así asegurar un sistema adecuado de agitación y un control de temperatura [2].

En la tabla 6 se puede observar la incidencia de la temperatura en el proceso de fermentación anaerobia y el tiempo de retención del sustrato en el reactor, evidenciando que a menor temperatura aumenta el tiempo de fermentación del proceso. Sin embargo, no se busca trabajar a temperaturas muy elevadas ya que existen problemas asociados a la inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a temperaturas altas, como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga. De igual manera, existen los riesgos colaterales al aumento del requerimiento energético y los costos asociados a la operación y a la configuración de los equipos [2].

Tabla 6.

Intervalos de Temperaturas y Tiempo de fermentación anaeróbica.

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo 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	75-80°C	10-15 días

Nota. La tabla presenta los intervalos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica. Tomada de: M. T. Varnero, “Manual del biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Santiago de Chile, Chile.,” 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>. [Último acceso: 28 Marzo 2022].

1.5.2. Tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica

Esencialmente este término hace referencia al volumen de sustrato orgánico que se carga a diario al reactor, sabiendo que este valor presenta una relación inversamente proporcional al tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención. En los reactores de tipo continuo, el tiempo de retención junto con la velocidad de carga orgánica es determinada por el tipo de sustrato y son los principales parámetros de diseño, los cuales definen el volumen del digestor. Dicho esto, la velocidad de degradación depende en gran medida de la temperatura, mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogás [2].

Por otra parte, la velocidad de carga orgánica (VCO) representa la cantidad de materia orgánica que ingresa a diario en el biodigestor por unidad de volumen, la cual es directamente proporcional de la concentración de sustrato y del tiempo de retención hidráulico establecido [2].

1.5.3. Intervalos de pH

Los intervalos de pH que se encuentran por fuera del óptimo inciden en gran medida en el proceso anaeróbico, ya que los microorganismos metanogénicos se ven afectados por cambios sustanciales en los niveles de pH, es por esto que se deben mantener valores cercanos a la neutralidad en donde se garantice la progresión correcta del proceso [2]. El valor del pH se ve directamente afectado por parámetros como: ácidos grasos volátiles (AGV), alcalinidad del medio, concentración de bicarbonato y por la fracción de CO₂ generado. Para mantener el valor de pH constante a lo largo del proceso es esencial controlar la relación entre AGV y las concentraciones de bicarbonato que podrían ser añadidos en el reactor continuo durante la etapa de inicio [9].

Es indispensable destacar que el valor de pH en el reactor afecta directamente la composición de biogás, el valor de este no debe ser inferior a 6 ni superior a 8. Un valor sustancialmente bajo de pH (menor a 6) implica que el biogás producido es pobre en metano y sus características energéticas son relativamente bajas. A su vez, los valores bajos restringen el correcto desarrollo de los microorganismos metanogénicos, ocasionando la acumulación de ácido acético e hidrógeno. Por otra parte, sabiendo que el pH altera los diferentes equilibrios químicos presentes en toda la

configuración del medio, este es capaz de desplazarlos al componente de interés que tenga mayor incidencia en el proceso, es por esto que un valor relativamente alto de pH puede favorecer la formación de amoníaco, el cual, en elevadas concentraciones, puede actuar como inhibidor del crecimiento microbiano del proceso.

1.5.4. Potencial redox

De acuerdo a los parámetros previamente establecidos para un crecimiento idóneo de los microorganismos en el proceso anaerobio, se sugiere que el valor óptimo del potencial redox se debe mantener entre -220 mV y -350 mV en un pH de 7.0, esto con el fin de garantizar un ambiente fuertemente reductor, necesario para que las bacterias metanogénicas desarrollen su actividad óptima [2].

1.5.5. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

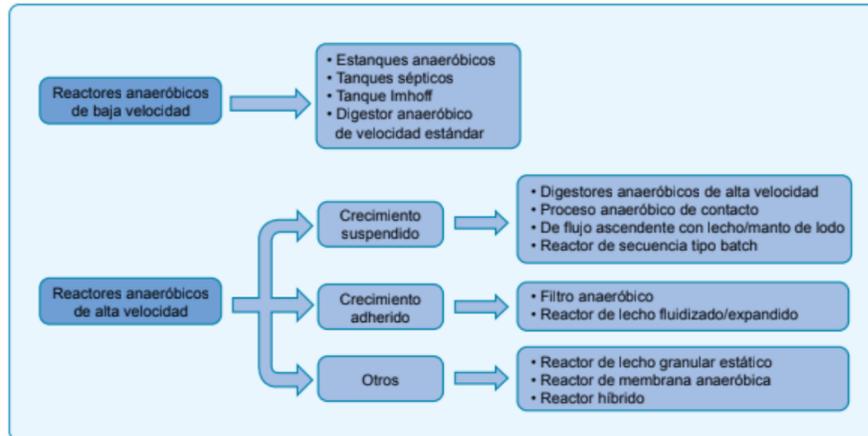
La Demanda Química de Oxígeno (DQO) establece el contenido de oxígeno necesario para poder oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua, esto operado en condiciones controladas de temperatura y tiempo [11]. Se establece que en toda digestión anaerobia el DQO disminuya respecto al principio de la operación debido a que la cantidad de materia orgánica ha sido disminuida gracias a la acción de los microorganismos [12].

1.6. Tipos de reactores

Como se puede observar en la figura 2, existen diversos tipos de reactores en los que se llevan a cabo múltiples reacciones que dan lugar al proceso de digestión anaerobia, en donde de manera general están bajo la clasificación de digestores anaeróbicos de baja velocidad o de alta velocidad. Los de baja velocidad esencialmente no se encuentran mezclados, en cambio en los sistemas de alta velocidad se mantiene un elevado nivel de biomasa en el reactor.

Figura 2.

Clasificación de los reactores anaerobios.



Nota. La figura presenta la clasificación de los reactores anaerobios. Tomada de: M. T. Varnero, “Manual del biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Santiago de Chile, Chile,” 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>. [Último acceso: 28 Marzo 2022].

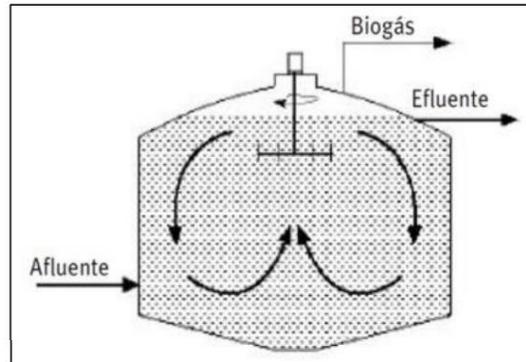
A continuación, se presentan los tipos de reactores más utilizados para llevar a cabo el proceso anaeróbico:

1.6.1. Reactor de tanque agitado continuo (CSTR) sin recirculación

Este se caracteriza por ser uno de los reactores más empleados en el proceso de digestión anaerobia, pero más específicamente en el tratamiento de residuos. Consiste básicamente en un reactor donde el sustrato y la biomasa se distribuyen de manera uniforme dentro del interior, con el fin de mantener las concentraciones constantes. La condición de uniformidad se adquiere a partir de una agitación constante, la cual puede ser mecánica mediante la utilización de agitadores de hélices o palas, de eje vertical u horizontal; o neumática como la recirculación a presión del biogás. El tiempo de retención hidráulico viene en función de la temperatura de operación [13].

Figura 3.

Reactor de mezcla completa sin recirculación.



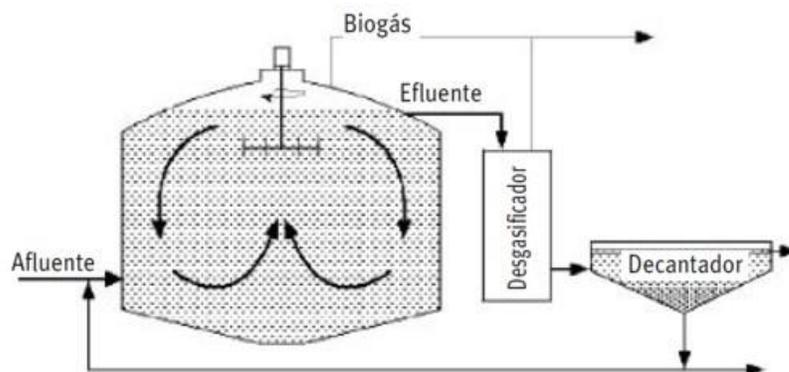
Nota. La figura muestra ilustrativamente el reactor de mezcla completa sin recirculación. Tomada de: BESEL S.A, «Biomasa: Digestores anaerobios. IDEA: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España.,» Octubre 2007. [En línea]. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_digestores_anaerobios_a2007_0d62926d.pdf. [Último acceso: 16 Marzo 2022]

1.6.2. Reactor de contacto

Este reactor también puede ser denominado como tanque agitado continuo (CSTR) con recirculación, el cual es equivalente a un sistema de captación de lodos activos para el tratamiento de aguas residuales. En esencia, este reactor se diferencia del anterior ya que posee un almacenamiento de líquido decantado el cual se recircula nuevamente al tanque para garantizar una alta concentración de biomasa cada vez que se vaya alimentando el sustrato. Es posible comprobar que en este reactor se consiguen tiempos de retención hidráulica más bajos que en un reactor simple de mezcla completa, esto con el fin de aumentar el tiempo de retención de los microorganismos [2].

Figura 4.

Reactor de contacto o de mezcla completa con recirculación.



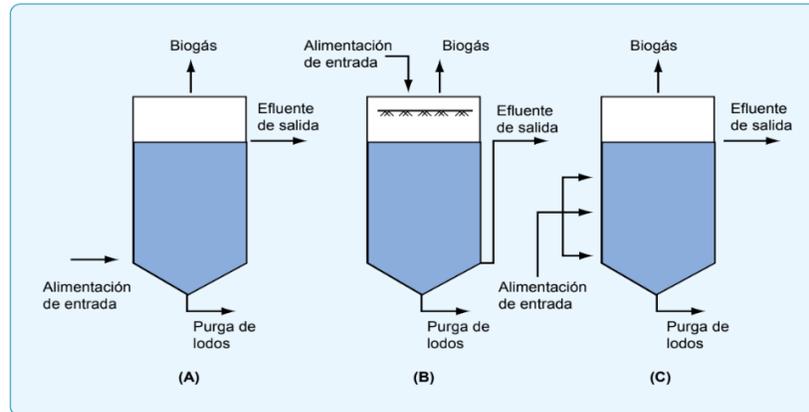
Nota. La figura presenta de manera ilustrativa el reactor de contacto o de mezcla completa sin recirculación. Tomada de: BESEL S.A, «Biomasa: Digestores anaerobios. IDEA: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España.,» Octubre 2007. [En línea]. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737biomasa_digestores_anaerobios_a2007_0d62926d.pdf. [Último acceso: 16 Marzo 2022]

1.6.3. Reactores de filtros anaeróbicos

Estos reactores se clasifican según la forma y el método de alimentación, en donde el filtro anaeróbico posee un medio estático el cual retiene la biomasa activa y procura el permanente contacto siempre con la premisa de estar en ausencia de oxígeno. Los filtros anaeróbicos se clasifican en tres: Filtro anaeróbico ascendente (FAA), filtro anaeróbico descendente (FAD) y filtro anaeróbico de alimentación múltiple (FAM), los cuales se evidencian a continuación en la figura 5.

Figura 5.

Clasificación de los reactores de filtros anaerobios.



Nota. La figura muestra la clasificación de los reactores de filtros anaerobios. Tomada de: M. T. Varnero, “Manual del biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Santiago de Chile, Chile,.” 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>. [Último acceso: 28 Marzo 2022].

1.6.3.a. Filtro anaerobio de flujo ascendente (A). Esencialmente este reactor es una configuración de un tanque tubular, el cual opera en un régimen continuo y el flujo se efectúa de forma ascendente, es decir que la carga es alimentada por la parte inferior reactor, atravesando en su trayectoria un lecho de piedras a plástico a medida que va ascendiendo en el reactor, para finalmente desembocar por la parte superior del mismo. Hoy en día, se utiliza un volumen poroso de plástico sintético o cerámico de aproximadamente 80% a 95% para proporcionar una elevada área superficial, la cual ronda de $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ [2].

1.6.3.b. Filtro anaerobio de flujo descendente (B). La configuración de este reactor es relativamente similar al de flujo ascendente, a excepción que en esta la biomasa está totalmente adherida al medio, acoplado el soporte bacteriano al reactor mediante la formación de canales verticales. La alimentación es efectuada desde arriba hacia abajo de la columna en donde se baña la totalidad del relleno para su posterior eliminación o recirculación. La acción de arrastre de la biomasa es debido a las fuerzas de fricción del líquido para permitir la utilización de contracorrientes es fase gaseosa y líquida con el fin de evitar la obstrucción en los canales [2].

1.6.3.c. Filtro anaerobio de alimentación múltiple (C). El sistema de alimentación de este reactor consiste en una alimentación múltiple al cuerpo del tanque en donde principalmente se permite una distribución homogénea de la biomasa a través de la cama del lecho, también mantiene en gran proporción un régimen de mezcla completa y una concentración uniforme del sustrato a lo largo de todo el reactor, lo cual previene la acumulación y obstrucción de ciertos ácidos grasos volátiles [2].

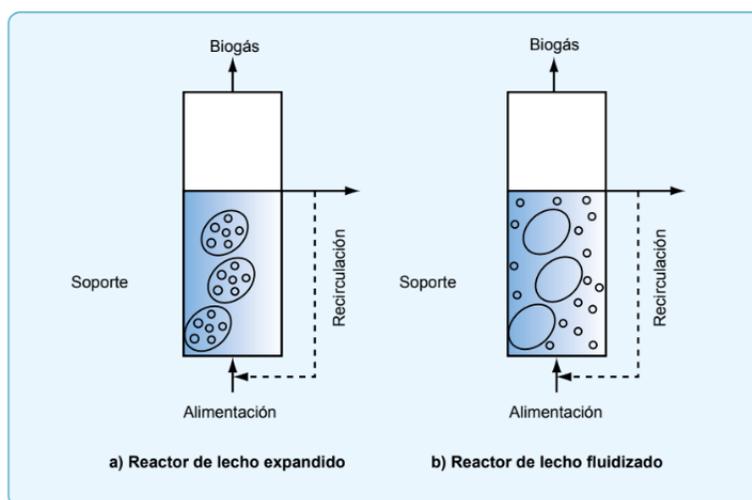
1.6.4. Reactor de lecho expandido y fluidizado

El reactor de lecho expandido consta de una estructura cilíndrica, la cual se encuentra empaquetada en aproximadamente 10% del total del volumen del reactor y trae consigo un pequeño soporte inerte que le otorga la capacidad de acumular elevadas concentraciones de biomasa para formar películas alrededor de las partículas, dichos soportes pueden estar compuestos de arena o carbón activado granular [2].

Por otra parte, el reactor de lecho fluidizado, como se observa en la figura 6, se compone a diferencia del reactor de lecho expandido, de una película totalmente fija debido a que la biomasa tiende a lavarse a causa de la gran velocidad del flujo ascendente. Este lecho puede adoptar una expansión de entre el 25% al 30% con una velocidad de flujo ascendente de 10-25 m/h [2].

Figura 6.

Representación esquemática de un reactor de lecho expandido fluidizado.



Nota. La figura representa de manera esquemática un reactor de lecho expandido fluidizado. Tomada de: M. T. Varnero, “Manual del biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Santiago de Chile, Chile.” 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>. [Último acceso: 28 Marzo 2022].

1.6.5. Reactor continuo

El funcionamiento de un reactor continuo se caracteriza por la entrada y salida de materia prima de forma constante e ininterrumpida durante todo el periodo de operación del proceso.

1.6.6. Reactor semicontinuo

El sistema de operación de un reactor semicontinuo se basa principalmente en agregar los reactivos o materias primas progresivamente en un determinado periodo de tiempo. Dicho esto, el régimen de alimentación semicontinuo tiende a ser más estable que el discontinuo, debido a que en el biodigestor solamente existe una pequeña porción de reactivo que no reacciona en cada instante, es por esto que las probabilidades de presenciar una reacción fuera de control debido a la pérdida del control de la temperatura o a problemas asociados con el sistema de agitación, son menos factibles a un sistema de régimen discontinuo [14].

1.6.7. Reactor tipo Batch

Los reactores Batch o discontinuos son recipientes dispuestos con una agitación en donde se cargan los reactivos y se descargan una vez la reacción ha concluido, estos se caracterizan por no trabajar en condiciones estacionarias, es decir, que la temperatura y las composiciones varían continuamente al transcurrir el tiempo [15]. La operación de este reactor es realizada por ciclos, la primera es denominada etapa de alimentación en donde el afluente es incorporado al reactor, posteriormente se encuentra la etapa de reacción en donde la materia orgánica es degradada en un tiempo variables, seguido de esto se presenta la etapa de sedimentación donde se detiene la agitación y la biomasa se decanta separando el efluente clarificado, y finalmente se tiene la etapa de descarga donde el efluente clarificado es retirado del reactor [2].

1.7. Otros sistemas

1.7.1. Sistema en una fase

La configuración de este sistema consiste en un solo reactor, donde se efectúan las 4 etapas de la digestión anaerobia, con un elevado tiempo de retención, en donde primordialmente la etapa de hidrólisis se ve favorecida. La naturaleza de este reactor es contar con un bajo tiempo de retención con el fin de digerir la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la etapa inmediatamente anterior [2].

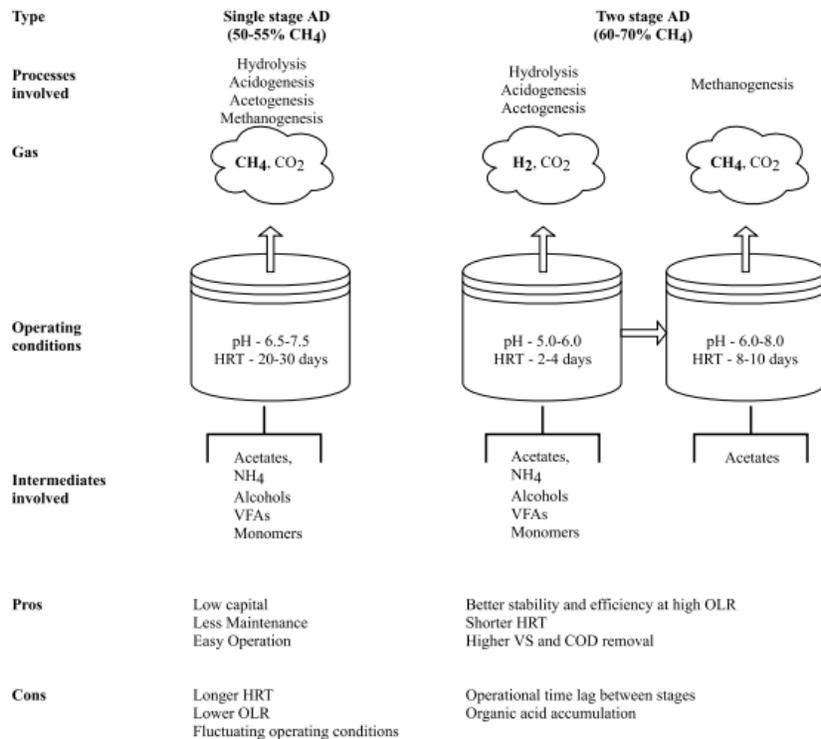
1.7.2. Sistemas de dos fases

A diferencia del reactor de una sola fase, este reactor efectúa la separación por fases manteniendo dos reactores en serie en los que se lleva a cabo las etapas de acidogénesis y metanogénesis. La principal finalidad de este tipo de configuración es lograr un tiempo de retención global inferior al correspondiente a un único reactor de mezcla completa. Este tipo de sistema es ampliamente utilizado en la digestión de residuos con una alta carga de azúcares, en donde se realiza una separación de tipo cinético en la cual se controla el tiempo de retención de cada reactor, que será menor al primero, debido a las tasas tan altas de crecimiento de las bacterias acidogénicas [2].

El proceso de tratamiento anaeróbico de dos fases tiene varias ventajas sobre los procesos convencionales, como se evidencia en la figura 7. En primer lugar, otorga la selección y el enriquecimiento de las diversas bacterias presentes en cada biorreactor; En la primera fase, los contaminantes difíciles son degradados por bacterias acidógenas en ácidos grasos volátiles (AGV), que posteriormente son convertidos en metano y dióxido de carbono por bacterias acetogénicas y metanogénicas en la segunda fase. En segundo lugar, aumenta la estabilidad del proceso controlando la etapa de acidificación para evitar la sobrecarga y la acumulación de material tóxico. En tercer lugar, la primera etapa puede actuar como un tampón metabólico, evitando el choque de pH en la población metanogénica; además, un pH bajo, una alta tasa de carga orgánica y un tiempo de retención hidráulico corto son factores que favorecen el establecimiento de la fase acidógena e impiden el establecimiento de metanógenos [16].

Figura 7.

Comparación de la digestión anaerobia en una o dos fases.



Nota. La figura evidencia una comparación del proceso de digestión anaerobia en dos fases. Tomada de: Srisowmeya G., Chakravarthy M., Nandhini G. “Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review”, noviembre 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109587> [Último acceso: 10 Marzo 2022].

1.8. Métodos de cuantificación de metano

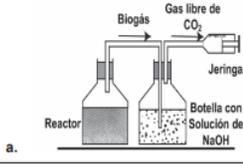
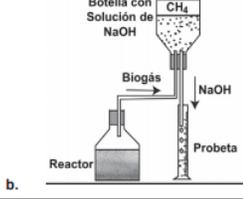
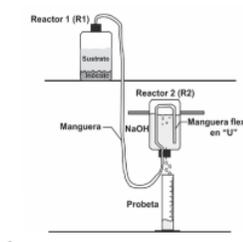
Una de las alternativas más empleadas hoy en día para la cuantificación del metano es por medio del ensayo de PBM (Potencial Bioquímico de Metano), el cual consiste en utilizar uno o varios sustratos y añadir progresivamente un inóculo activo bajo condiciones operacionales definidas, para medir la producción de CH_4 , mediante diferentes métodos (método manométrico, volumétrico o de cromatografía de gases). En este ensayo influyen diversos factores los cuales se pueden agrupar en cuatro diferentes subgrupos: características del sustrato, características del inóculo, condiciones operacionales y condiciones experimentales. Los métodos manométricos y volumétricos son los más utilizados en los ensayos de PBM que dependiendo de la configuración de los mismo, miden el biogás generado en el proceso de digestión anaerobia. Por otra parte, también se puede efectuar por medio de una cromatografía de líquida de alta eficacia (HPLC) para cuantificar el metano obtenido [17].

A continuación, en las figuras 8, 9 y 10 se pueden observar ilustrativamente como es la configuración básica y la disposición en general de los métodos de cuantificación de metano mediante técnicas volumétrica, manométricas y cromatográficas. A su vez, se presentan algunas ventajas y limitaciones en cuanto a la utilización y puesta en práctica de dichos métodos esencialmente en su eficiencia y eficacia a lo hora de producir el biogás.

1.8.1. Método volumétrico

Figura 8.

Configuración básica, ventajas y desventajas del método volumétrico.

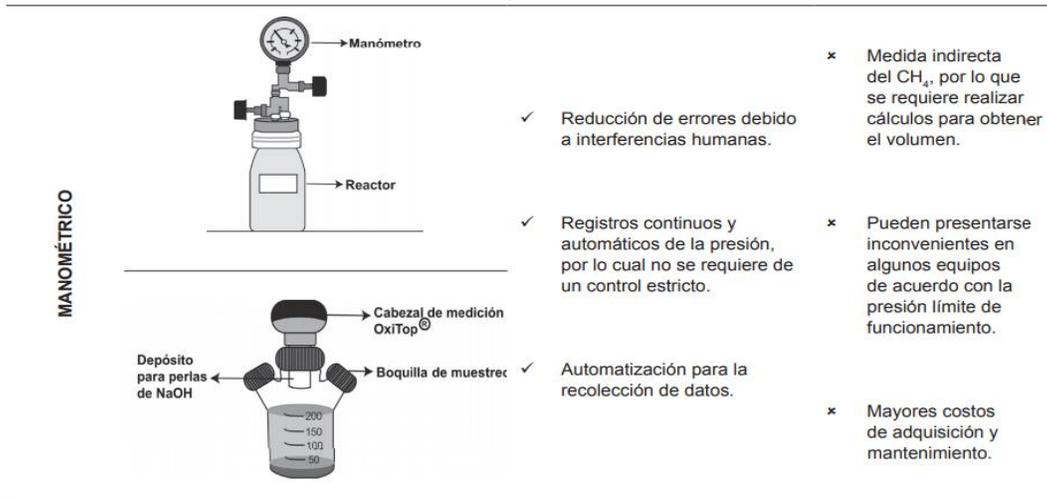
MÉTODO	CONFIGURACIÓN BÁSICA	VENTAJAS	LIMITACIONES
VOLUMÉTRICO	 <p>a.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Simplicidad y bajos costos. ✓ Medición directa del contenido de CH_4 en el biogás empleando una solución alcalina que captura el CO_2. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Microfugas en los equipos pueden incrementar la producción real de CH_4.
	 <p>b.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Configuraciones experimentales de bajo costo que pueden ser implementadas en cualquier laboratorio ✓ Capacidad de trabajar por largos periodos sin necesidad de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Requiere medición constante del volumen desplazado (al menos 3 veces al día) y agitar los reactores para mejorar el contacto entre el sustrato e inóculo y favorecer evacuación del biogás.
	 <p>c.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La configuración C. evita que R1 se vea afectado en el caso que ocurra succión del NaOH por presiones negativas; adicionalmente, la manguera en forma de "U" ubicada en R2 fue ideada para actuar como un sifón, evitando el paso del NaOH hacia R1. 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Verificación continua de la cantidad y el pH de la solución alcalina desplazante.

Nota. La figura presenta la configuración básica, las ventajas y desventajas del método volumétrico para la cuantificación de biogás. Tomada de: L. M. Cárdenas-Cleves, B. A. Parra-Orobio, P. Torres-Lozada y C. H. Vásquez-Franco, "Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. Cali, Colombia.," 5 Enero 2016. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008> [Último acceso: 2 Marzo 2021].

1.8.2. Método manométrico

Figura 9.

Configuración básica, ventajas y desventajas del método manométrico.

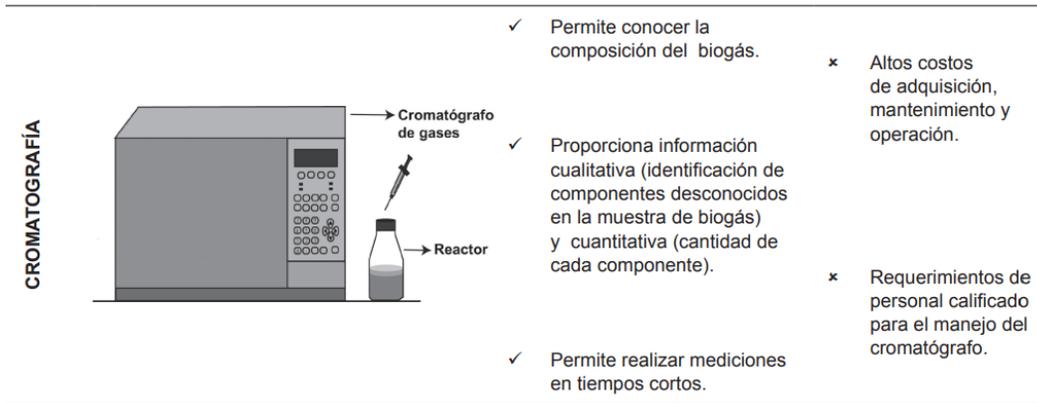


Nota. La figura presenta la configuración básica, las ventajas y desventajas del método manométrico para la cuantificación de biogás. Tomada de: L. M. Cárdenas-Cleves, B. A. Parra-Orobio, P. Torres-Lozada y C. H. Vásquez-Franco, “Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. Cali, Colombia.,” 5 Enero 2016. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008> [Último acceso: 2 Marzo 2021].

1.8.3. Método cromatográfico

Figura 10.

Configuración básica, ventajas y desventajas del método cromatográfico.



Nota. La figura presenta la configuración básica, las ventajas y desventajas del método cromatográfico para la cuantificación de biogás. Tomada de: L. M. Cárdenas-Cleves, B. A. Parra-Orobio, P. Torres-Lozada y C. H. Vásquez-Franco, “Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. Cali, Colombia.,” 5 Enero 2016. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008> [Último acceso: 2 Marzo 2021].

2. SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE FRUTAS CÍTRICOS

2.1. Metodología

Los parámetros y estándares fisicoquímicos seleccionados para realizar la evaluación del sustrato se efectúan a partir de una revisión bibliográfica detallada, en la cual se presentan y caracterizan las variables más incidentes en el proceso de digestión anaerobia, en donde se destacan: ácidos grasos volátiles (AGV), alcalinidad, sólidos totales, humedad, relación carbono/nitrógeno, material volátil, macronutrientes y micronutrientes. Estos valores se constituyen como parámetros ideales para el proceso de digestión anaerobia expresados en la base de fundamentación teórica inherentes a cada especie de fruta. Por otra parte, se analizaron de forma experimental las propiedades ya mencionadas de los residuos de cascara de naranja, mandarina y limón con el fin de comparar lo teórico con lo experimental.

2.2. Desarrollo

La matriz de selección expuesta en la tabla 9, se desarrolló teniendo en cuenta los parámetros más relevantes. El primer parámetro es la disponibilidad de los residuos, la cual tiene una correlación con la implementación del diseño presentado, debido a que los residuos deben estar de manera asequible. El proyecto de grado está enfocado para aquellas empresas de alimentos o cultivadores colombianas, tanto urbana como rural, donde su principal actividad es procesar y/o cosechar frutas cítricas, tales como naranja, mandarina y limón. Como lo señala la tesis “Evaluación de la obtención de biogás mediante la digestión anaerobia de los residuos de fruta generados por una empresa de alimentos a escala laboratorio”, la cual presenta la problemática de una empresa que procesa este tipo de frutas y genera una cantidad de residuos como subproducto de la extracción de jugo, el cual es utilizado dentro del proceso de producción principal. Adicional, indica la adquisición de la excreta de ganado vacuno proporcionada por Frigoríficos Ble Ltda [18]. También, la empresa Frutolima dedicada a la cosecha y distribución en Bogotá D.C., donde manejan productos de diferentes especies, tales como naranja Valencia, mandarina Arrayana, mandarina Oneco y limón Tahití [18]. De igual forma, se propone en uso de excretas bovinas de las finca y/o ganadería cerca de la zona.

Las especies mencionadas anteriormente, representan gran abundancia de cultivo en todo el país. En primer lugar, el 48.14% de la producción de cítricos es representada por la naranja Valencia (*Citrus sinensis*) la cual es principal variedad de naranja dulce cultivada en las regiones citrícolas del país, recolectando alrededor de 497,226 toneladas de la fruta en 2016. Seguido de esto, en Colombia la mandarina es el segundo cítrico de mayor relevancia debido a su área de cultivo, en donde las variedades más cultivadas son: Arrayana y Oneco en mayor proporción. Por último, Santander es el departamento que encabeza la producción de la lima ácida (en Colombia denominado usualmente como limón Tahití), ya que cada año se cosechan alrededor de 21,000 toneladas de este fruto.

El segundo factor que se tuvo en cuenta en la matriz es el rendimiento de cada residuo. Este es regido por las repercusiones de las características fisicoquímicas más relevantes e incidentes en el proceso, en donde para realizar la clasificación y asignación de porcentajes, se analizaron y compararon con los parámetros ideales expuestos en la fundamentación teórica para el proceso de digestión anaerobia encontrados para cada residuo de fruta utilizado en este trabajo. Las características fisicoquímicas tenidas en cuenta para otorgar el peso en la matriz fueron las siguientes: sólidos totales, relación C/N, ácidos grasos volátiles (AGV), alcalinidad lignina, celulosa, hemicelulosa y nutrientes aportados. Esto se llevó a cabo mediante la ponderación y asignación de diferentes parámetros, evidenciados en la tabla 7, con el fin de evaluarlos e identificar su incidencia en el proceso de digestión. También, en donde se le asigna un porcentaje a cada parámetro dependiendo de su relevancia de acuerdo a una detallada revisión bibliográfica, sabiendo que entre más incidente e importante sea ese parámetro en el proceso, mayor peso se le dará en la matriz. La relevancia de cada característica fisicoquímica está desglosada a lo largo del desarrollo de este capítulo.

Por otra parte, se decide evaluar los residuos en conjunto, es decir, como un mix de fruta donde todas sus características fisicoquímicas y operativas serán analizadas bajo esta premisa. Cabe aclarar, que la caracterización efectuada por medio del laboratorio se representa únicamente como un marco comparativo a los datos otorgados por la revisión bibliográfica, en otras palabras, consiste en constatar que tan cerca o alejadas se encuentran sus propiedades respecto a la teoría para posteriormente realizar un cotejo y poder definir de manera asertiva las mejores condiciones de operación del proceso.

Estas muestras fueron analizadas por un laboratorio bajo un mix de residuos, en donde se respetó la proporción de mezcla obtenida en la matriz de selección (tabla 9), cuyo propósito fue únicamente para fines comparativos y por los requerimientos solicitados por el laboratorio. Por otro lado, los datos teóricos para cada parámetro fisicoquímico están representados de manera individual para cada residuo, sin embargo, se decide realizar la comparación de esta forma para observar el aporte individual en el proceso al igual que su incidencia como mix en la degradación anaeróbica. Cabe resaltar que esto no influye en la relación material/agua presentada ni en los balances de materia ya que estos fueron efectuados con los parámetros de proporción de mezcla obtenidos y con las variaciones de humedad total, teniendo en cuenta la relación de residuo cuando se propone la codigestión (excretas) y su aporte de humedad.

Tabla 7.

Parámetros y porcentajes de la matriz de selección

	Parámetro	Porcentaje
I	Disponibilidad del residuo	30%
II	Sólidos totales	10%
III	Relación C/N	15%
IV	Ácidos grasos volátiles (AGV)	15%
V	Alcalinidad	5%
VI	Lignina	5%
VII	Celulosa	5%
VIII	Hemicelulosa	5%
IX	Nutrientes aportados	10%
	TOTAL	100%

Nota. La tabla presenta los parámetros y porcentajes asignados para la construcción de la matriz de selección ponderada.

La clasificación y puntuación asignada en la matriz de selección dependiendo del tipo de residuo se encuentra plasmada en la tabla 7. Sin embargo, los criterios y valores óptimos empleados fueron establecidos mediante el criterio de investigadores y profesionales del tema, los cuales se establecen de la siguiente forma y se pueden observar en la tabla 8.

Tabla 8.

Criterios de evaluación dependiendo del parámetro asignado

Asignación	Significado
0	No cumple con el parámetro
1	Cumple de manera parcial con el parámetro
2	Cumple en su gran mayoría con el parámetro
3	Cumple de manera total con el parámetro

Nota. La tabla muestra los criterios de evaluación tenidos en cuenta dependiendo del parámetro asignado.

Finalmente, al analizar todas las variables de carácter primordial, se determinó los porcentajes totales para cada residuo, el cual se muestra en la tabla 9.

Tabla 9.

Matriz de selección

Residuo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Total	Porcentaje sobre el total
Cáscara de naranja	1	1	3	1	1	2	3	3	1	1.55	28%
Cáscara de mandarina	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1.75	32%
Cáscara de limón	3	1	2	2	3	1	2	2	2	2.2	40%
TOTAL										5.55	100%

Nota. La tabla muestra la matriz de selección ponderada.

Como se mencionó inicialmente, para el acceso y el contexto de los residuos a utilizar se pretende dar una perspectiva teniendo como referencia el trabajo de grado anteriormente citado, en donde lo referente a la disponibilidad del recurso será analizado bajo los periodos de procesamiento de las frutas seleccionadas en un intervalo de tiempo, así como su demanda a lo largo del proceso anaeróbico teniendo en cuenta la información otorgada por parte de la empresa. En primer lugar, en lo relacionado a la **disponibilidad del residuo** se decidió asignarle una importancia del 30% sobre el total, dado que este factor es el más determinante para la escogencia y disposición del sustrato en la mezcla y representa la materia prima en todo el proceso de digestión anaerobia, ya

que este debe estar disponible en las cantidades requeridas en todo momento y su aprovechamiento se dictamina teniendo en cuenta los residuos que posean mayor demanda productiva en términos de cantidad y disposición final de mismo [19].

En la tabla 10 se observan los kg producidos por parte de la empresa en el primer semestre del año 2020, aclarando que esta posee diversas líneas de producción las cuales dependen esencialmente del sistema de procesamiento, de la demanda del mercado y del lugar donde se efectúa la recepción de las frutas [19].

Tabla 10.

Residuos producidos en kg 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

Nota. La tabla presenta los residuos en kg producidos por la empresa durante el primer semestre de 2020. Tomada de: K. J. Escárraga y N. Espinosa, “Evaluación de la obtención de biogás mediante la digestión anaerobia de los residuos de fruta generados por una empresa de alimentos a escala laboratorio” 2019. [En línea]. Disponible en: https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8176/1/6151546-2020-III-IQ.pdf_.pdf [Último acceso: 12 Julio 2022].

En la tabla 10 se observa la cantidad de frutas procesadas por la empresa para ese periodo de tiempo, resaltando las elevadas cantidades de limón y mandarina que fueron solicitadas por parte de ellos debido a la alta demanda existente en el mercado y su capacidad de procesamiento en cada línea de producción, donde se evidencia que es constante y cumple con las solicitudes hechas por clientes, proveedores, entidades de recolección y terceros. Teniendo en cuenta que el limón tiene un nivel de demanda mucho más alto en comparación a las otras dos frutas, se decidió asignarle una ponderación de 3, seguido de este se encuentra la mandarina con una puntuación de 2, y finalmente a la naranja se le asignó una calificación de 1 debido a este producto en su gran mayoría es exportado, implicando una baja tasa de generación de residuos [19].

En lo relacionado al **rendimiento del residuo** analizado en base a las propiedades y características fisicoquímicas inherentes a cada fruta, se decidió distribuir el 70% restante en ellas, en donde dependiendo de su importancia, relevancia y/o aporte al proceso se le asignó un mayor peso en la matriz de selección. Para la incidencia de los ácidos grasos volátiles (AGV) se estipuló ponderarlos con un peso de 15%, ya que estos representan todos los productos intermedios obtenidos en cada etapa del proceso y que serán transformados en metano durante la degradación anaeróbica, en donde a las cáscaras de limón y mandarina se les otorgó un valor 2 ya que estas sobrepasan los niveles de AGV óptimos y un valor de 1 para la cáscara de naranja al ser la más cercana a los niveles de concentración óptimos de ácidos grasos volátiles. De igual forma, a la relación C/N se decidió otorgarle un peso del 15% sobre el total ya que este parámetro representa el aporte de energía y nutrientes necesarios para llevar a cabo el proceso. Según los parámetros teóricos de relación C/N expuestos en la tabla 13, la fruta que más se aproxima a la relación óptima es la naranja por lo que se decidió asignarle un valor de 3, seguida por la mandarina y limón cada una de ellas con un valor de 2 debido a que sus proporciones de nitrógeno se encuentran más alejadas del valor óptimo.

El peso de la cantidad de sólidos totales presentes en el proceso se decidió establecerlo en un 10%, ya que estos deben ser suficientes para permitir un mejor contacto de las bacterias metanogénicas y así evitar la inhibición del medio. Para la proporción 1:1 donde se encuentran la mayor cantidad de sólidos totales y que se especifica a lo largo del desarrollo del capítulo, se decide asignarle un valor de 2 a la mandarina dado su incidencia en el proceso y a pesar de sobrepasar un poco el intervalo óptimo. Para el caso de la naranja y el limón, estos se encuentran dentro del rango óptimo, sin embargo, su aporte es de menor cuantía en comparación a la mandarina, por eso se les asigna un valor de 1. De la misma manera, los nutrientes aportados tuvieron una incidencia del 10% sobre la ponderación total, debido al aporte de calorías y energía necesaria para efectuar una correcta síntesis de la biomasa. Los macronutrientes inmersos en este análisis global son: calcio, fósforo, hierro, magnesio, potasio, selenio, sodio y zinc, y por su parte los micronutrientes tenidos en cuenta en la ponderación matricial son: cromo, cobalto, cromo, manganeso, molibdeno, níquel y vanadio. Estos fueron determinados como los nutrientes aportados al proceso y por eso se efectúa una caracterización de cada uno de los sustratos en su aporte individual a cada elemento.

En menor proporción se encuentran los aportes de la alcalinidad, lignina, celulosa y hemicelulosa donde el peso otorgado fue del 5%, las razones y la base teórica de cada uno se encuentran fundamentadas y desglosadas a lo largo del capítulo.

Por otro lado, se evaluó las características fisicoquímicas más importantes en el proceso de digestión anaerobia, de forma experimental mediante el laboratorio BioPolab, el cual es un centro especializado en análisis fisicoquímicos y microbiológicos de alimentos, consta de las acreditaciones de calidad en el marco de la norma vigente hasta la fecha, en las que se destacan: 18-LAB-029 bajo la norma ISO/IEC 17025:2017 y la norma NTC/ISO 17025 acreditada por el IDEAM.

Los residuos se pueden observar en la figura 11 y los resultados experimentales obtenidos se sintetizaron en la tabla 11, pero de igual forma en el anexo A se encuentra toda la información respectiva del consolidado de resultados otorgados por el laboratorio.

Figura 11.

Residuos de cáscara de limón, mandarina y naranja, respectivamente.



Nota. La figura presenta de manera ilustrativa los residuos de cáscara de limón, mandarina y naranja, respectivamente, que fueron empleados en la caracterización en el laboratorio.

Tabla 11.

Resultados de la caracterización fisicoquímica experimental.

Parámetro	Mix de residuos
Sólidos Totales (g/100g)	26.9
Nitrógeno total (g/100g)	0.75
Lignina (%)	2.05
Celulosa (%)	20.85
Hemicelulosa (%)	13.2

Nota. La tabla muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica experimental entregada por parte del laboratorio.

2.2.1. Sólidos totales

La definición de sólidos totales se establece como la materia que se mantiene como residuo después proceso de evaporación y secado. La importancia de los sólidos totales involucra todo lo relacionado a materias disueltas (sólidos disueltos totales: porción que pasa a través del filtro) y no disuelto (sólidos suspendidos totales: porción de sólidos totales retenidos por un filtro). Toda materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST) [11].

La cantidad de sólidos totales conservados en la mezcla reactiva que ingresa como carga al biodigestor es un parámetro clave a tener en cuenta para garantizar que el proceso se efectúe correctamente, teniendo claro que dentro del sustrato la movilidad de las bacterias metanogénicas puede verse afectada o limitada a medida que se incrementa el contenido de sólidos en el medio reaccionante y consecuentemente la producción de biogás y el rendimiento del proceso puede tener problemas asociados [2].

Se ha demostrado de forma experimental que para una carga en regímenes semicontinuos el contenido de sólidos debe oscilar entre 8% a 12%, con el fin de asegurar el correcto funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, los cuales poseen un contenido de sólidos totales entre un 40% a un 60% [2].

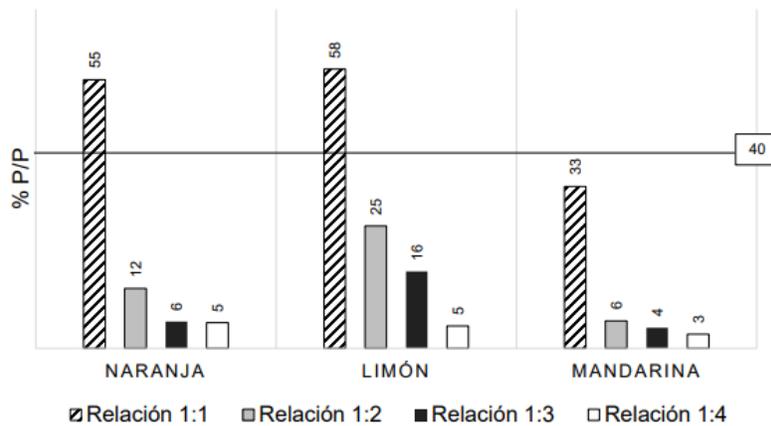
Se afirma igualmente que es recomendable que la digestión anaerobia se produzca con contenido en sólidos totales inferiores al 10%, es decir contenido de sólidos volátiles en torno al 6%-8%. Esto esencialmente indica que el contenido de biomasa adecuada para utilizar es aquella que tenga alto contenido de agua. Por otra parte, bajas concentraciones de sólidos no permitirán que el

digestor opere eficientemente, ya que el biogás producido tendrá bajas cantidades de metano, además se puede producir una separación indeseada en la alimentación, de modo que los sólidos más pesados se hundan y formen lodos, mientras que los sólidos más ligeros floten y produzcan espuma o escoria en la parte superior del líquido. Esta espuma se irá secando a medida que pase el tiempo, causando la formación de una capa solida la cual evita que el gas se libere del líquido y bloque las tuberías, esto no ocurrirá si el porcentaje de solidos totales está dentro del parámetro requerido [20].

A partir de lo mencionado anteriormente, para un sistema discontinuo, el porcentaje de solidos totales expuestos en la tabla 11, es bajo. Por lo cual, se propone realizar lo expuesto por la tesis “Evaluación de la obtención de biogás mediante la digestión anaerobia de los residuos de fruta generados por una empresa de alimentos a escala laboratorio” de los autores Karen Escárraga y Nicolás Espinosa donde desarrollaron la evaluación de % de solidos totales mediante el método gravimétrico en diferentes proporciones sustrato/agua [19], obteniendo la siguiente gráfica:

Figura 12.

Sólidos totales de la mezcla de residuos.



Nota. La figura muestra los sólidos totales de la mezcla dependiendo de la relación empleada. Tomada de: Escarraga, K., Espinosa, N. “Evaluación de la obtención de biogás mediante la digestión anaerobia de los residuos de fruta generados por una empresa de alimentos a escala laboratorio” 2019. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8176> [Último acceso: 5 Abril 2022]

Por ende, según la figura 12, se puede evidenciar que la relación más factible para desarrollar el proceso es la 1:1 debido a que dos de los tres residuos se encuentran dentro de este rango y ninguno sobrepasa el intervalo.

Para calcular los sólidos totales de forma experimental mediante el método gravimétrico se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 1.

Contenido de sólidos totales.

$$\text{Sólidos totales(\%)} = ST(\%) = \frac{\text{peso}_{105^{\circ}\text{C}} - \text{tara}}{\text{peso muestra}} * 100$$

2.2.2. Material volátil

El contenido de material volátil (MV) o sólidos volátiles (SV) hace referencia esencialmente a la cantidad de materia seca (MS) o sólidos totales (ST) que pueden volatilizarse durante procesos de incineración a temperaturas superiores a 550°C. De acuerdo con parámetros y requisitos de operación para un biodigestor anaerobio, el contenido de materia seca no debe sobrepasar el 10% de la mezcla de agua-residuo [2]. En la tabla 12 se presentan los valores teóricos del porcentaje de material volátil que deben contener los residuos orgánicos a utilizar en el proyecto.

Tabla 12.

Material volátil teórico para los residuos.

Residuo	Material Volátil (%)
Naranja	71.08
Mandarina	77.10
Limón	83.02

Nota. La tabla presenta el porcentaje teórico de material volátil para cada residuo. Información extraída: A. F. Rojas González y C. Flórez Montes, «VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE FRUTAS PARA COMBUSTIÓN Y PIRÓLISIS,» 24 Abril 2019. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1395/1164> [Últimos acceso: 20 de febrero 2022]

El tiempo de retención y el contenido de material volátil están estrechamente relacionados, ya que dicho tiempo representa el cociente entre el volumen y el caudal de tratamiento, es decir, el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos [21].

Por otra parte, los sólidos volátiles se clasifican como el remanente posterior al proceso de secado pero que se pierden al calcinar el residuo, teniendo en cuenta que estos están asociados a la materia orgánica presente en la muestra. Dicha materia volátil de las cáscaras de los residuos de mandarina, naranja y limón son de bajo peso molecular por lo cual su degradación se desarrolla en la etapa de acetogénesis y metanogénesis.

2.2.3. *Relación carbono/nitrógeno*

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono representa la fuente energética y el nitrógeno es empleado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, Es por esto que la relación óptima oscila en un intervalo de 30:1 hasta 20:1 para estos dos elementos [2].

Residuos con un alto contenido de carbono, superior a 35:1, se caracterizan por efectuar un proceso de descomposición de la materia relativamente lento debido a que la multiplicación y formación de bacterias es bajo, a causa de la insuficiencia de nitrógeno, sin embargo, el periodo productivo de producción de biogás es más extenso. Por el contrario, una relación C/N inferior de 8:1 inhibe sustancialmente la actividad bacteriana tras la formación de un desmedido contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso [2].

La relación C/N se puede determinar teniendo en cuenta la composición de cada materia prima, a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 2.

Determinación experimental de la relación C/N

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

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.

De acuerdo con la tabla 13, se evidencia la composición teórica de carbono y nitrógeno para cada residuo de fruta cítrica.

Tabla 13.

Relación carbono/nitrógeno teórico.

Relación		Naranja	Mandarina	Limón
	Formula empírica	$C_{20}H_{28.5}O_{13}N_{0.09}S_{0.02}$	$C_{20}H_{29.1}O_{13.5}N_{0.13}S_{0.04}$	$C_{20}H_{29.7}O_{14}N_{0.21}S_{0.03}$
	% Carbono (C)	20	20	20
	% Nitrógeno (N)	0.09	0.13	0.21

Nota. La tabla presenta la relación carbono/nitrógeno teórico para cada residuo. Información extraída de: A. F. Rojas González y C. Flórez Montes, «VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE FRUTAS PARA COMBUSTIÓN Y PIRÓLISIS,» 24 Abril 2019. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1395/1164> [Últimos acceso: 20 de febrero 2022]

Como se evidencia en la tabla 11 y en la tabla 13, los resultados experimentales y teóricos respectivamente, no cumplen con la relación óptima de relación carbono/nitrógeno ya que se encuentran muy por debajo de los límites establecidos y no se lograría obtener las cantidades necesarias de biogás, es por esto que dicha relación debe ser corregida para asegurar una correcta digestión del sustrato.

Para poder corregir la alteración presentada en la relación carbono/nitrógeno es necesario aumentar la concentración o niveles de nitrógeno en el sustrato, para eso, existen dos alternativas posibles que elevarían sustancialmente la cargas de N_2 en el sistema. La primera, consiste en utilizar un segundo sustrato junto con los residuos orgánicos, este deberá poseer un alto contenido de nitrógeno el cual permita mejorar la relación C/N y deberá ser consumido a lo largo del proceso adyacentemente con los residuos, en donde parte de su biomasa se transformará en biogás. Se debe tener en cuenta que al agregar un cosustrato implicará un aumento del volumen efectivo a tratar y una posible disminución del aporte de la carga orgánica en el proceso [22]. Esta alternativa es bastante interesante, ya que se están aprovechando las excretas de animales, las cuales son consideradas como desechos y además se genera una conciencia ambiental entorno a la economía circular.

La segunda alternativa se encamina a la utilización de sustancias químicas, en donde igualmente se agrega una fuente de nitrógeno a los residuos cítricos, sin embargo, su masa no se transformará

en biogás ya que se consume durante el proceso. La fuente puede estar compuesta por amoniacos, ureas y/o abonos con alto contenido de nitrógeno, no obstante, se carece de información referencial de la utilización de estos productos en los procesos de digestión anaerobia [22].

Es por esto que para elevar los intervalos de la relación carbono/nitrógeno, se decide optar por el uso de un cosustrato, pero más específicamente el uso de excretas de origen animal debido a las ventajas que ofrece sobre otras fuentes de nitrógeno y además por sus múltiples usos y aplicaciones en los procesos de digestión y codigestión anaerobia. La finalidad principal del cosustrato será reducir la masa necesaria del sustrato para poder elevar los niveles de nitrógeno y así mejorar considerablemente la relación, ya que un cosustrato que sea pobre en nitrógeno necesitará gran cantidad de masa para poder elevar la relación C/N, aumentando costos de operación y gastos energéticos.

En tabla 14, se muestran diferentes relaciones de carbono/nitrógeno, los cuales se evaluaron junto con los residuos mediante la ecuación 2 para determinar cuál excreta animal se ajusta al rango.

Tabla 14.

Relación carbono/nitrógeno de diferentes excretas.

Materiales	% C	% N	C/N
Residuos animales			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1

Nota. La tabla muestra la relación carbono/nitrógeno teórico para diferentes excretas. Tomada de: M. T. Varnero, “Manual del biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Santiago de Chile, Chile.” 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>. [Último acceso: 28 Marzo 2022].

De acuerdo a la tabla 14, se evidencia que la relación C/N es elevada para los casos de las excretas de equinos, ovinos, caprinos, patos y pavos. Por lo cual, las excretas mencionadas anteriormente se descartan ya que no cumplen con el objetivo principal a que poseen un bajo contenido de nitrógeno.

Se determina la relación C/N utilizando los datos teóricos de la tabla 14, con el fin de evaluar que excreta se encuentra dentro del rango 20:1 a 30:1. De acuerdo con los resultados obtenidos, se decidió utilizar las excretas bovinas ya que su relación se acerca a la relación óptima (30:1).

Otro aspecto importante es la relación sustrato/inocuo sobre el proceso de digestión anaerobia. Mediante una revisión bibliográfica, se evidencio que la relación con mayores rendimientos de producción de metano es 1:2 en comparación a la relación 1:3 [23]. Además, las relaciones mayores a 1:2 genera en el proceso una desestabilización debido a la acumulación de ácidos grasos por su baja capacidad buffer del sistema [24].

Como se mencionó en la sección “2.2. Desarrollo” del presente capítulo, la disponibilidad de la materia prima es vital para el desarrollo debido a que se considera una base del proceso para lograr la transformación de estas mediante un proceso microbiológico para obtener biogás. De modo que, la disponibilidad de las excretas bovinas puede estar presenten en la ciudad y/o en el campo. Es el caso de la empresa Frigoríficos Ble Ltda dedicada a los procesos de sacrificios y faenado de bovinos ubicada en Bogotá D.C, donde uno de sus residuos son las excretas. Cabe mencionar, el bovino adulto defeca de 10 a 15 veces por día y la cantidad total de heces eliminada es de unos 20 a 30 kg por día, pudiendo elevarse hasta 45 kg. La cantidad de excretas puede variar dependiendo de la raza, alimentación y condiciones ambientales [25].

Las excretas deben ser utilizadas lo más frescas posibles, ya que el tiempo desde que se producen hasta que se utilizan, se generan perdidas de nutrientes. El artículo “El estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente” plantea que hay tres tipos de pérdida que se puede presentar:

2. Gaseosa: El estiércol contiene elementos que pueden volatilizarse y si no se almacenan de una forma adecuada, se pierden. Estas pérdidas pueden suponer 10 kg por cada 100 kg del nitrógeno [26].
3. Lavado: Por lo general, el estiércol puede almacenarse al aire libre y, por lo tanto, al llover, el agua puede arrastrar los componentes nutritivos. Por esta vía se pueden perder 20 kg por cada 100 kg del nitrógeno [26].
4. Filtración: Estas pérdidas se producen cuando los líquidos del estiércol pasan al suelo [26].

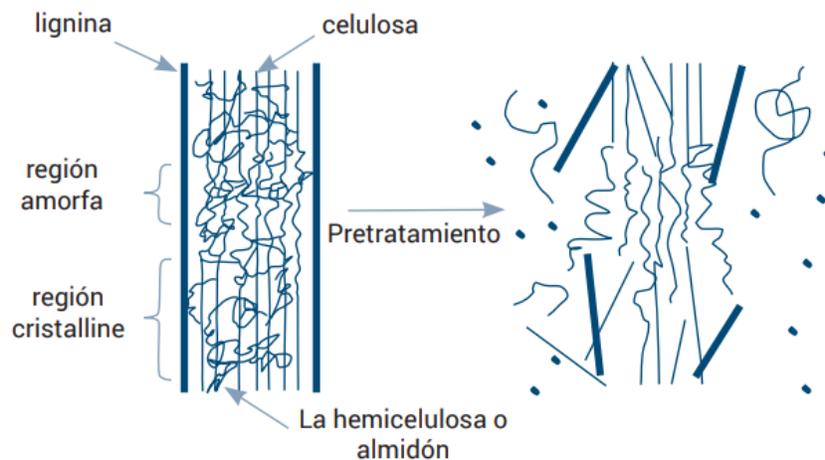
2.2.4. Compuestos lignocelulósicos

La mayor fuente de carbón orgánico lo constituyen los compuestos lignocelulósicos, entre los que destacan la lignina, celulosa y hemicelulosa, las cuales son resistentes a la degradación bacteriana debido a que sus moléculas están constituidas por polisacáridos, ácidos grasos y proteínas [27].

Una de las fuentes primarias de hexosas y pentosas es, la biomasa con características lignocelulósicas arraigadas en residuos orgánico y agrícolas, debido a su alto contenido de celulosa y hemicelulosa. Aunque, conseguir el fraccionamiento de esta biomasa para obtener polímeros de celulosa y hemicelulosa no es tarea fácil, dado que el elevado contenido de lignina presente dificulta la disgregación de polisacáridos para su posterior hidrólisis, es por esto que es necesario utilizar tratamientos físicos, químicos, biológicos o la combinación de estos, lo suficientemente estables y rígidos que permitan el rompimiento de los polímeros sin desencadenar reacciones alternas de estos azúcares o productos indeseados [28].

Figura 13.

Estructura de biomasa lignocelulósica.



Nota. La figura presenta de manera ilustrativa la estructura de la biomasa lignocelulósica. Tomada de: Cortes, W. “Tratamientos Aplicables a Materiales Lignocelulósicos para la Obtención de Etanol y Productos Químicos” 2014. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.18270/rt.v13i1.1297> [Último acceso: 26 Marzo 2022]

La lignina se considera un polímero aromático amorfo formado por la unión de ácidos, alcoholes fenilpropiónicos y diversos azúcares. Físicamente es un compuesto recalcitrante debido a que otorga rigidez, impermeabilidad y resistencia en la pared celular. Este polímero se caracteriza por brindar la unión a los componentes de la biomasa, su estrecha asociación con las microfibrillas de la celulosa evita su degradación efectiva, es por esto que el contenido de lignina limita la hidrólisis enzimática y microbiana de la biomasa, por lo cual es el principal limitador de la velocidad del proceso global al degradar residuos lignocelulósicos [29].

El contenido de lignina, hemicelulosa y celulosa teórico para cada residuo se encuentra descrito en la tabla 15. Sin embargo, debido a que en el reactor se ingresará una mezcla de los residuos, en la tabla 11, se exponen en conjunto el valor de la lignina, celulosa y hemicelulosa, en los cuales se puede determinar que presenta bajo porcentaje de lignina, en seguida de hemicelulosa y mayor porcentaje de celulosa.

Tabla 15.

Porcentaje de lignina, celulosa y hemicelulosa teórico.

Residuos	% Lignina	% Celulosa	% Hemicelulosa
Naranja	7.6	23.5	10.4
Mandarina	9.1	20.2	7.8
Limón	8.9	21.6	6

Nota. La tabla presenta el porcentaje de lignina, celulosa y hemicelulosa teórico para cada residuo. Información extraída de: Tejeda, L., Marimón W., Medina M. “Evaluación del potencial de las cáscaras de frutas en la obtención de bioetanol,” 2014. Disponible en: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/hm/article/download/323244/20780454/107262> [Último acceso: 24 Marzo de 2022].

Cabe resaltar que la hemicelulosa es una estructura compleja de carbohidratos que consiste en polímeros de diferentes azúcares como xilosa y arabinosa (pentosas), manosa, glucosa, galactosa (hexosas) y ácidos de azúcar. A su vez, la hemicelulosa sirve como una conexión entre la lignina y las fibras de celulosa ya que le da al conjunto de celulosa-hemicelulosa-lignina gran rigidez [28]. Esta recubre la superficie de las fibras de celulosa y es más propensa a ataques termoquímicos, es debido a esta razón que cuando la biomasa pasa por un pretratamiento y la hemicelulosa se elimina, la digestibilidad de la celulosa se incrementa [29]. A su vez, la hemicelulosa tiene un peso molecular más bajo que la celulosa, y con cadenas laterales cortas que constan de diferentes polímeros de azúcares, fáciles de hidrolizar.

Por otro lado, la celulosa está compuesta por subunidades de D-glucosa adheridas por un enlace glucosídico β 1-4 que forman cadenas lineales y otorgan soporte estructural. Las capas de celulosa se juntan y forman las llamadas fibrillas de celulosa o paquetes de celulosa, estas fibrillas de celulosa son en su mayoría independientes y débilmente unidos a través de enlaces de hidrógeno, sin embargo, estos enlaces pueden generar zonas amorfas o cristalinas. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa y glucosa. La celulosa es el compuesto mayoritario de la pared celular [27].

Debido a que los componentes lignocelulósicos pueden afectar la hidrólisis es necesario realizar un tratamiento previo, el cual facilita el rompimiento de la lignina y así, obtener el acceso a la celulosa y hemicelulosa. Lo cual, si se reduce la celulosa cristalina, aumenta la porosidad del material, mejorando la exposición de estos polisacáridos a la hidrólisis química o enzimática [30]. A través del pretratamiento se pretende romper la pared celular de la biomasa con la alteración de la lignina y la estructura cristalina para facilitar la hidrólisis de la celulosa. La lignina se degrada lenta e incompletamente. Por lo anterior, sustratos difícilmente biodegradables como los lignocelulósicos se recomienda ser sometidos a pretratamientos agresivos como hidrólisis ácida, básica o explosión de vapor, de forma que las bacterias hidrolíticas sean capaces de transformarlos en compuestos simples que serán el alimento en las etapas sucesivas [29].

Por otro lado, hay parámetros que son necesarios monitorear durante el proceso de digestión anaerobia en dos fases, por ende, se realizó una recopilación de datos relevantes en diferentes artículos que ayuden con la correcta funcionalidad de dicho proceso, los cuales se muestran a continuación y se catalogan como parámetros operativos inherentes al proceso:

2.2.5. Ácidos grasos volátiles

El contenido de ácidos grasos volátiles (AGV) es uno de los parámetros que más eficazmente pueden indicar la evolución del proceso. A partir la degradación anaeróbica, la materia orgánica se hidroliza y posteriormente fermentada en compuestos de bajo peso molecular, como ácidos grasos de cadena corta (C2-C6), en los que se destacan los ácidos acético, propiónico y butírico y en menores proporciones ácidos isobutírico, valérico, isovalérico y caproico [2].

En la tabla 16, se recopiló información relevante sobre el efecto que tienen los ácidos grasos volátiles en el proceso.

Tabla 16.

Parámetros teóricos de los ácidos grasos volátiles.

Incidencia de los ácidos grasos volátiles (AGV) en la actividad metanogénica del proceso de digestión anaerobia			
Manual del biogás (FAO) 2011	La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. (2013)	Volatile fatty acids (VFAs) and methane from food waste and cow slurry: Comparison of biogas and VFA fermentation processes (2018)	Definición de las condiciones de operación que maximizan la producción de Ácidos Grasos Volátiles (2020)
<p>La carga y concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) los cuales son productos intermedios mayoritarios del proceso fermentativo definen que durante la degradación anaeróbica la materia orgánica es hidrolizada y fermentada en compuestos de bajo peso molecular incluyendo, en su mayoría, compuestos de bajo peso molecular, es decir, ácidos grasos de cadena corta (C2-C6) Teóricamente se establece que, en un sistema anaeróbico óptimo, la concentración de AGV en el efluente es relativamente baja y se encuentra usualmente en el</p>	<p>La composición residual que depende inherentemente de la sustancia que lo componga (orgánicas e inorgánicas) determina su biodegradación anaeróbica, es decir que en general mientras más complejo sea el residual, más ácidos grasos volátiles (AGV) se producen y al final el rendimiento de CH₄ es mayor. En la mayoría de los casos, gran parte de los autores afirman que la concentración de AGV en un digestor no debe sobrepasar los 2 kg/m³. Sin embargo, se plantea generalmente que una concentración de 0.3 kg/m³ en el digestor puede considerarse como óptima. En este caso este autor concuerda</p>	<p>Los ácidos grasos volátiles (AGV) son intermediarios en la ruta de formación de metano de la digestión anaeróbica y se pueden producir en reactores similares a los del biogás para aumentar la productividad de una planta de digestión, ya que los AGV tienen usos finales más variados en comparación con el biogás y el metano. Sin embargo, este autor afirma que actualmente existe la necesidad de evaluar el potencial varias biomásas como sustratos para consorcios mixtos de ácidos grasos volátiles con el fin de impulsar la producción de productos químicos verdes en la economía circular. Es decir que, a comparación de los otros dos autores, este autor se centra en que la fermentación de los AGV y los procesos de producción de metano podrían implementarse</p>	<p>Para este autor la intención de conocer el diseño específico de la digestión anaerobia para la producción de ácidos grasos volátiles se basa en la implementación de la cantonización catalítica de una mezcla modelo de ácidos grasos volátiles de composición similar a los obtenidos en la fermentación anaerobia continua, usando como catalizador dióxido de zirconio. Esto quiere decir que, si el proceso es sometido a temperaturas entre 375°C-400°C se obtendrá un 92% de rendimiento global, es decir que a mayor temperatura el proceso será mucho más productivo, aunque se debe tener en cuenta que si la transformación a</p>

<p>rango de 50-250 mg HAC/l.</p> <p>La acumulación progresiva de AGV'S en el sistema se debe principalmente cuando la relación entre la cadena acidogénica y metanogénica se rompe, ocasionando el incremento repentino de acetato e hidrógeno debido a la toxicidad del sistema (sulfuro, amoniaco, metales pesados, compuestos sintéticos), cambios en las condiciones ambientales (temperatura, pH, potencial redox) o a la limitación de nutrientes.</p>	<p>con la FAO en el hecho de que existen evidencias que la concentración de inhibidores de la digestión, depende en gran medida del tipo de ácido presente en ella. En general, se demuestra que mientras más pequeña sea la cadena estructural del ácido, más pequeña es la concentración de éste que puede inhibir el proceso.</p> <p>Una cantidad excesiva de AGV en el sistema puede ser provocada por la presencia de una carga orgánica muy elevada, por una caída de la temperatura o por la acumulación de mucha espuma.</p>	<p>en serie para maximizar e incrementar la utilización del carbono de la biomasa para la producción tanto de metano como de AGV.</p> <p>Por otro lado, el autor apoya la idea de que los desperdicios alimenticios y el estiércol componen una fracción prometedora como sustratos con el fin de estudiar el efecto del proceso de cambio del efluente de metano a AGV para el aumento de dicho producto.</p>	<p>través de un sistema de condensación de cetonas en el efluente del reactor, el rendimiento podría aumentar a un 99%.</p>
--	--	--	---

Nota. La tabla presenta la perspectiva de los parámetros teóricos de ácidos grasos volátiles por diversos autores. Información extraída de: Tampio, E., Blasco, L., Vainio, M., Kahala, M., Rasi, S. "Volatile fatty acids (VFAs) and methane from food waste and cow slurry: Comparison of biogas and VFA fermentation processes" 2018. Disponible en: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcbb.12556#:~:text=Volatile%20fatty%20acids%20\(VFAs\)%20are,compared%20to%20biogas%20and%20methane](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcbb.12556#:~:text=Volatile%20fatty%20acids%20(VFAs)%20are,compared%20to%20biogas%20and%20methane). [Último acceso: 20 Marzo 2022].

En un sistema anaeróbico óptimo, la concentración de AGV a la salida del reactor es baja y usualmente se encuentra en el intervalo de 50-250 mg HAC/l. Cuando la relación simbiótica entre acidogénicos y metanogénicos se rompe, los AGV se acumula, causando la inhibición de los metanogénicos debido a factores de toxicidad (sulfuro, amoniaco, metales pesados, compuestos orgánicos sintéticos, etc.), cambios en las condiciones ambientales (pH, temperatura, potencial redox) o limitación de nutrientes pueden generar la acumulación de acetato e hidrógeno. Una

presión parcial excesiva de hidrógeno, inhibe en gran medida las bacterias que degradan ácido propiónico, resultando en la acumulación de éste. Al igual que el sulfuro y el amoníaco, las formas no ionizadas de AGV inhiben las bacterias metanogénicas cuando presentan concentraciones de 30-60 mg/L. Un aumento en la concentración de ácidos volátiles en el sistema, implica una desestabilización del proceso y, en consecuencia, una disminución de la producción de biogás [2].

2.2.6. Alcalinidad

El valor de la alcalinidad está estrechamente relacionado con el pH debido a la formación de ácidos orgánicos intermedios en el proceso de digestión anaerobia. Durante este proceso, la alcalinidad se ve afectada por cambios sustanciales en la operación del reactor a lo largo de la digestión y también por diversas reacciones desencadenadas a medida que transcurre la fermentación, es por esto que se debe hacer uso de agentes alcalinizantes o de soluciones Buffer, con el fin de regular el pH en el sistema [6].

Establecer un sistema regulado con niveles de alcalinidad suficiente para mantener el pH en el rango óptimo de operación es clave, ya que los procesos de digestión anaerobia generan ácidos orgánicos intermedios. Dicha alcalinidad es generada durante todo el proceso de digestión anaerobia, en donde por ejemplo las proteínas que se encuentran presentes en las aguas residuales pueden eliminar trazas de amonio y sales orgánicas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la presencia de agentes alcalinizantes agregados al influente, pueden incrementar el buffer del medio. Concentraciones altas de alcalinidad por encima de 6500 mg/L y valores de pH superiores a 7,4 sugieren que la actividad bacteriana puede verse afectada debido a varios efectos tóxicos de alcalinidad [10].

El monitoreo de la alcalinidad en reactores anaerobios se puede catalogar como más eficiente comparado al seguimiento y control que se le debe hacer a los sistemas de monitoreo de pH, ya que este trabaja en una escala logarítmica, mientras que la alcalinidad lo hace en una escala lineal. Es por esto, que una disminución considerable en el pH, implica un consumo elevado de la alcalinidad, resultando en una considerable pérdida de la capacidad del buffer [6].

Por otra parte, el principal sistema químico que regula y monitorea el pH de la digestión anaerobia es el sistema de dióxido-bicarbonato a través de la siguiente ecuación de equilibrio:

Ecuación 3.

Equilibrio sistema dióxido-bicarbonato

$$[H^+] = K_1 \cdot \frac{[H_2CO_3]}{[CO_3H^-]}$$

Inherentemente la concentración en este caso de ácido carbónico está estrechamente relacionada con el por ciento de dióxido de carbono en el biodigestor. A su vez, la concentración del anión bicarbonato es relativamente equivalente a la alcalinidad total de gran parte de las aguas residuales que tengan una baja concentración de ácidos grasos volátiles (AGV). Pero se debe tener en cuenta que cuando la concentración de AGV incrementa, estos serán neutralizados por la alcalinidad al bicarbonato y por ende la alcalinidad total del sistema estará compuesta por ambas alcalinidades, es decir, al bicarbonato y a los AGV [6].

En consecuencia, con lo mencionado anteriormente, la capacidad amortiguadora de la alcalinidad debida a los ácidos grasos volátiles ocurre en la franja de pH entre 3.75 y 5.75, esto quiere decir que durante un periodo de tiempo diversas sustancias que ejercen cierto tipo de tapón, impiden la caída del pH. Significando que cuando toda la alcalinidad presente en el medio no es suficiente para poder neutralizar los ácidos volátiles, ocurrirá una repentina caída del pH [31].

A continuación, en la tabla 17 se pueden observar los intervalos operacionales óptimos de la alcalinidad propuestos por varios autores.

Tabla 17.

Intervalos operacionales propuestos por varios autores para la alcalinidad.

Artículo	Rango operacional
Manual del biogás (FAO) 2011	El proceso anaeróbico es adversamente afectado con cambios pequeños en los niveles de pH. El óptimo es entre 5.5 y 6.5 para acidogénicos y entre 7.8 y 8.2 para metanogénicos. Lo que quiere decir que la operabilidad optima del valor de la alcalinidad para estos pH, oscila entre 6400 a 6600 mg/L.
La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. (2013)	El valor de la alcalinidad es un digestor anaerobio debe estar cercano a los 2 kg/m ³ , aunque no debe tomarse como un valor constante ya que en muchas ocasiones debe

	añadirse álcali a los digestores para elevar el pH de estos.
Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria (2015)	En este caso concentraciones altas de alcalinidad las cuales sobrepasen los 6500 mg/L y valores de pH superiores a 7.4 sugieren en gran medida que los procesos de actividad bacteriana en el sistema anaeróbico pueden verse afectados debidos a los efectos tóxicos de la alcalinidad.

Nota. La tabla muestra los intervalos operacionales propuestos por diversos autores para la alcalinidad.

2.2.7. Humedad

La biomasa con contenido de humedad inferior al 60 % se considera biomasa seca y es destinada principalmente a la conversión termoquímica como los procesos de combustión, pirólisis, y gasificación. Por el contrario, la biomasa húmeda (>60 %) tiene como fin la conversión química y bioquímica. En la conversión química se lleva a cabo la transesterificación para la producción de biodiesel. En la conversión bioquímica se transforma a metano e hidrógeno mediante fermentación anaerobia o puede realizarse una fermentación alcohólica para la producción de etanol [29].

Dicho eso, la biomasa utilizada para la digestión anaerobia debe tener un alto contenido de humedad (80% a 90%) la cual está principalmente compuesta por polisacáridos, proteínas, lípidos, lignina y la combinación de excretas con agua que denomina como purines [20]. En la tabla 18, se observa que los desechos de naranja, mandarina y limon se encuentran dentro de este rango.

Tabla 18.

Porcentaje teórico de humedad.

Residuo	% Humedad
Naranja	88.5
Mandarina	87.2
Limón	89.7

Nota. La tabla presenta el porcentaje teórico del contenido de humedad para cada residuo. Información extraída de: Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. “Tabla composición Alimentos Colombianos,” 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.icbf.gov.co/system/files/tcac_web.pdf [Último acceso: 18 Marzo 2022]

Es necesario subrayar la humedad que presentan las excretas bovinas y su influencia en el proceso de digestión anaerobia. La propuesta de las excretas bovinas consiste en su adición una única vez en el primer reactor. Su humedad oscila en aproximadamente 83%, la cual se encuentra dentro del rango óptimo estipulado para este parámetro. Sin embargo, la humedad de las excretas no influye en el proceso debido a que estas no son utilizadas directamente sino que tienen un pretratamiento, el cual consta de una mezcla con el fin de que los nutrientes presentes en las excretas bovinas, en especial el nitrógeno, puedan ser transportados y suministrados mediante el agua, es decir, que el aporte de humedad se encuentra en función del inóculo y no de su aporte individual en toda la mezcla.

Este pretratamiento consiste esencialmente en aumentar la degradación de la materia orgánica en términos de la acción biológica de los consorcios bacterianos y del aporte nutricional otorgado por las excretas bovinas como fuente principal de nitrógeno, que como se mencionó anteriormente, dichos nutrientes serán movilizados y estarán inmersos en el agua que ingresa directamente al primer reactor, por consiguiente, las excretas no tienen ningún contacto con los cultivos de microorganismos presentes en los reactores ni en las corrientes que traen consigo la mezcla reactiva, ya que se pretende únicamente extraer el contenido nutricional aportado por ellas para efectuar la codigestión. El pretratamiento químico no solamente da paso al proceso fermentativo, sino que es una opción bastante viable para fomentar los procesos hidrolíticos y de neutralización presentes, debido a que aumentan considerablemente la fuente de carbono y se obtienen monosacáridos con una configuración química mucho más simple [32]. El proceso de extracción depende esencialmente de la temperatura, la concentración y tipo de ácido empleado, en donde el uso de ácidos diluidos es uno de los métodos más empleados para el pretratamiento de compuestos lignocelulósicos enfocado principalmente a la hidrólisis enzimática, este es capaz de alcanzar un porcentaje de remoción cercano al 100% de hemicelulosa, no afecta la lignina y mejora sustancialmente la hidrólisis de la celulosa [32]. Dicho eso, el medio ácido a emplear para efectuar el sistema de extracción, será con ácido sulfúrico a una concentración de 0.18 M y con una tasa de solubilización efectiva de alrededor del 24.5%, con el fin de aumentar la producción de biogás [32].

De igual forma, el agua añadida es la misma cantidad que se estipuló en la sección “2.2.1. Sólidos totales”, donde se subrayó que se va a utilizar una proporción másica fruta/agua de 1:1 en términos del %P/P, debido a que esta es la mejor proporción con mayor cantidad de sólidos totales de los tres residuos en la mezcla, sabiendo que para reactores discontinuos el porcentaje óptimo debe oscilar en un intervalo de 40% a 60%. Aquí el agua rica en nutrientes es mezclada con los residuos de naranja, mandarina y limón para luego ingresarlas al primer biodigestor. En el reactor, se encuentra en la parte inferior, un malla que retiene los sólidos provenientes de la mezcla y su funcionamiento consta principalmente de la percolación del agua a través de los residuos en degradación. Sin embargo, esta configuración será fundamentada a más detalle en el capítulo “4. Propuesta de diseño”.

2.2.8. *Macronutrientes y micronutrientes.*

La digestión anaerobia es un proceso que se llevaba a cabo mediante operaciones bioquímicas, por ende, los macronutrientes y micronutrientes deben estar presentes para lograr la síntesis de la biomasa. Una de las ventajas de este proceso es que requiere bajo porcentaje de nutrientes. En la tabla 19 se recopila información teórica necesaria para el proceso.

El aporte individual de cada elemento observado en la tabla 19 fue tenido en cuenta en la construcción del modelo matricial empleado, en donde se analizó y tuvo en cuenta su incidencia en la caracterización de cada uno de los sustratos, por eso se le dio un peso del 10% sobre el total. Ese aporte nutricional otorgado por los macronutrientes y micronutrientes es clave en la influencia que tienen sobre el desempeño de los microorganismos, independientemente de la fase del proceso que se esté llevando a cabo.

Tabla 19.

Parámetros teóricos de los micronutrientes y macronutrientes.

<p>Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria (2015)</p>	<p>Bioestimulación de la digestión anaerobia (2012)</p>	<p>Manual del biogás (FAO) 2011</p>
<p>Las bacterias en el proceso de D.A. requieren micronutrientes y elementos traza como nitrógeno, fósforo, sulfuros, potasio, calcio, magnesio, hierro, níquel, cobalto, zinc, manganeso y cobre para el crecimiento óptimo. A pesar de que estos elementos son necesarios en concentraciones extremadamente bajas, las ausencias de estos nutrientes tienen efectos adversos sobre el crecimiento y rendimiento microbiano. Las bacterias formadoras de metano tienen concentraciones internas relativamente altas de hierro, níquel y cobalto.</p>	<p>Una baja adición de metales esenciales puede tener un efecto estimulador en sistemas biológicos, mientras que, la presencia elevada de metales tiene un efecto tóxico a nivel celular, ya que causan estrés oxidativo al generar radicales libres. Una limitación en los metales esenciales puede significar un decremento en la producción de metano y significar además un aumento en la inestabilidad del sistema.</p> <p>Por otro lado, el hierro como nutriente destaca por aumentar la conversión de ácido acético en metano y por su efecto positivo en la reducción de sulfatos.</p> <p>De igual forma, consideran de carácter esencial la presencia de metales como el Níquel, Cobalto y el Hierro, puesto que las bacterias metanogénicas tienen requerimientos especiales en cuanto a estos elementos metálicos y a algunos cationes para su crecimiento y algunos</p>	<p>En el desarrollo de cualquier proceso bioquímico los macronutrientes y micronutrientes son claves para un funcionamiento óptimo de los microorganismos anaerobios, estos no solamente le otorgan las calorías o energía necesaria para su progreso, sino que son indispensables para un buen funcionamiento de la actividad metanogénica.</p> <p>Trazas de metales tales como Hierro, Cobalto, Molibdeno, Selenio, Calcio, Magnesio, Zinc, Cobre, Manganeso, Tungsteno y Boro a niveles de mg/L y la vitamina B12 en niveles de µg/L, se ha encontrado que mejoran la producción de metano. Además, la demanda de fósforo corresponde a 1/7 – 1/5 de la demanda de nitrógeno. Como regla general, se asume que un 10 % de la materia orgánica removida (DQO) durante el proceso anaeróbico se utiliza para la síntesis de biomasa.</p>

	<p>tienen un gran requerimiento de Sodio. Además, el Calcio, Potasio, Magnesio, Manganeso, Molibdeno, Sodio y Zinc son considerados importantes en diversos procesos celulares. De manera general, los requerimientos de las bacterias metanogénicas van en el siguiente orden: Mg = Ca > Fe > Zn > Ni > Co = Mo > Cu > Mn.</p> <p>La presencia de micronutrientes tales como Hierro, Níquel, Cobalto, Selenio, Molibdeno, Manganeso y Tungsteno provocan estabilidad membranal, transferencia de nutrientes y ahorro de energía en bacterias productoras de metano tales como las bacterias reductoras de azufre.</p>	<p>Níquel: el Ni es particularmente importante para los metanogénicos debido a que es un constituyente estructural del factor F430, el cual se encuentra exclusivamente en las bacterias metanogénicas.</p> <p>Cobalto: El Co es importante debido a que también es un constituyente estructural de la vitamina B12, la cual cataliza la metanogénesis. El níquel, cobalto y otros minerales traza son esenciales para la degradación del metanol en un reactor bajo condiciones mesofílicas.</p>
--	--	---

Nota. La tabla expone los parámetros teóricos de los micronutrientes y macronutrientes bajo la perspectiva de diversos autores.

De igual forma, en la tabla 20 se señalan los componentes necesarios para el proceso, los cuales se catalogan como indispensables y claves para el proceso de digestión anaerobia.

Tabla 20.

Componentes necesarios para el proceso de digestión anaerobia.

Componente	Función
Nitrógeno	Siguiente más abundante después del carbono. Elemento principal en ácidos nucleicos y aminoácidos.
Fosforo	Para ácidos nucleicos y fosfolípidos.
Azufre	En los aminoácidos cisteína y metionina, vitaminas como tiamina, biotina y ácido lipídicos, coenzimas.
Potasio	Utilizado por varias enzimas diferentes.
Magnesio	Estabiliza los ribosomas, las membranas celulares y los ácidos nucleicos.
Sodio	Necesario para muchas enzimas.
Calcio	Ayuda a estabilizar la pared celular bacteriana y es importante para estabilizar las endosporas.
Hierro	Presente en citocromos.
Micronutrientes	Suelen ser necesarios para enzimas específicas. Algunos de los micronutrientes son: Cr, Co, Cu, Mn, Mo, Ni, Se, V, Zn.

Nota. La table presenta los componentes necesarios para efectuar el proceso de digestión anaerobia. Información extraída de: Angelidaki, I., Sanders, W. “Assessment of the anaerobic biodegradability of micropollutants”, 2004. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/225249844_Assessment_of_the_anaerobic_biodegradability_of_macropollutants. [Último acceso: 28 Marzo 2021].

De acuerdo con la tabla nutricional de la mandarina, naranja y limón, se realizó la tabla 21 con los micronutrientes y macronutrientes teóricos.

Tabla 21.

Micronutrientes y macronutrientes teóricos necesarios para la digestión anaerobia.

Nutriente	Unidad	Naranja	Mandarina	Limón
Calcio (Ca)	mg	33	35	19
Fósforo (P)	mg	20	21	15
Hierro (Fe)	mg	1.3	0.3	0.5
Magnesio (Mg)	mg	213	12	8
Potasio (K)	mg	134	151	143
Selenio (Se)	µg	1	0	1
Sodio (Na)	mg	2	2	4
Zinc (Zn)	mg	0.5	0.2	0.1

Nota. La tabla presenta los micronutrientes y macronutrientes necesarios para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia. Información extraída de: Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. “Tabla composición Alimentos Colombianos,” 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.icbf.gov.co/system/files/tcac_web.pdf [Último acceso: 18 Marzo 2022]

Así como existen compuestos que ayudan a la producción de biogás y a obtener un alto rendimiento, hay otros compuestos que inhiben el proceso, por ende, se deben evitar al máximo con el fin de prevenir una disminución de la obtención del producto de interés, en este caso, el biogás.

Los inhibidores pueden estar presentes en las materias primas o durante el proceso de digestión anaerobia. Algunas de las sustancias inhibidoras son el amoníaco, sulfatos, sulfuros, metales pesados, cianuros, fenoles, entre otros. En la tabla 22 se muestran los compuestos inhibidores en el proceso con sus respectivas cantidades.

Tabla 22.

Concentraciones inhibidoras de ciertas sustancias en un proceso anaeróbico

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO ₄ ⁻	5000 ppm
NaCl	40000ppm
NO ₃ ⁻	0.05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN ⁻	25 mg/l
Na	3500-5500 mg/l
K	2500-4500 mg/l
Ca	2500-4500 mg/l
Mg	1000-1500 mg/l

Nota. La tabla muestra las concentraciones inhibidoras de ciertas sustancias que pueden incidir en el proceso anaeróbico. Tomada de: M. T. Varnero, “Manual del biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Santiago de Chile, Chile.,” 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>. [Último acceso: 28 Marzo 2022].

3. CONDICIONES DE OPERACIÓN

3.1. Metodología

Las condiciones de operación en un sistema son de gran importancia, dado que son los parámetros en los cuales los microorganismos van a trabajar de manera correcta, garantizando su crecimiento y la obtención del producto de interés. Dichas condiciones abarcan tanto el sistema exterior como el interior, es decir, las condiciones ambientales del lugar no pueden afectar las condiciones específicas de los reactores, la materia prima debe estar adecuada para el ingreso a los reactores, entre otras.

Lo anterior, se desarrolló mediante de una revisión bibliográfica detallada y una evaluación de ventaja y desventajas para determinar las condiciones de operación más beneficiosas para efectuar el proceso.

3.2. Desarrollo

Para garantizar que el proceso de digestión anaerobia se desarrolle de manera adecuada, no solo es importante que las materias primas cumplan con los parámetros óptimos, sino también que el sistema cuente con las condiciones de operación necesarias para la producción de biogás en un sistema discontinuo, mediante una revisión bibliográfica.

Cada sistema de digestión anaerobia en dos fases utiliza un sustrato en particular con la adición o no de inocuos y condiciones de operación determinadas, con el fin de cumplir con el objetivo principal, obtener biogás. La tabla 23 expone diferentes autores, con la cual se pretende comparar los diferentes rendimientos de biogás con sus condiciones de operación para así determinar las condiciones que mejor se ajustan para los residuos de naranja, limón y mandarina.

Tabla 23. Comparación de sistemas de digestión anaerobia en dos fases.

Tipo de residuo	Sistema	Reactor 1								Reactor 2						Obtención de CH ₄ (L/kgVS)	Ref
		Agit	V (L)	OLR (gVS/Ld)	%ST	%SV	TRH (d)	pH	T (°C)	Agit	V (L)	OLR (gVS/Ld)	TRH (d)	pH	T (°C)		
Residuos de fruta y verduras	CSTR CSTR	Mec	15	7	12.7±0.9	11.0±0.8	25	5.3	35	Mec	6	-	5	7.4 7.8	35	300	[33]
Residuos sólidos urbanos	CSTR Semi-UASB	Mec	9	2.76	6.2	-	8.9	-	56	Mec	14	-	20.9	-	36	18	[34]
Lodo de aguas residuales	CSTR Semi-UASB	Mec	9	0.669	6.0	3.7	17.33	-	56	Mec	14	-	44.2	-	36	24	
Mezcla de lodo de aguas residuales y residuos sólidos urbanos	CSTR Semi-UASB	Mec	9	3.084	10	8.7	11.1	-	56	Mec	14	-	17.3	-	36	23	
Residuos de alimentos	CSTR CSTR	Hid	31	3.2	3.2±0,12	1,8±0,01	15	6,4 8,3	37±2	Hid	28	3,2	15	7,6 8,5	37±2	500.2	[35]
Residuos vegetales	CSTR RALF	Mec	3	0.15	5,4 ± 0,4	2,9 ± 0,4	6	5 7	37	-	4	-	8	7 8	37	0.29 ± 0.01	[36]
				0.1												0.33 ± 0.02	
				0.17												0.33 ± 0.03	
				0.23												0.31 ± 0.05	
Residuos de fruta y vegetales	CSTR UASB	Mec	2	11	8.46	4.54	3	4	35	-	1	-		35	3.9	[37]	

Agit: Agitación, V: Volumen, OLR: Tasa de carga orgánica, ST: Sólidos totales, SV: Sólidos Volátiles, T: Temperatura, TRH: Tiempo de retención hidráulico, Ref.: Referencia, CSTR: Reactor de tanque agitado continuo, UASB: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente, RAFA: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente, RALF: Reactor de lecho fluidizado, Mec: Mecánica, Hid: Hidráulica.

Nota. Comparación de los sistemas de digestión anaerobia en dos fases por diversos autores.

3.2.1. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula puede estar ligado al pretratamiento de los residuos de naranja, mandarina y limón antes de ser ingresados a los reactores, cuyo objetivo es aumentar la biodegradabilidad. De acuerdo con la tabla 5, la cual está relacionada al artículo “Critical considerations in two stage anaerobic digestion of food waste-A review”, se plantean diferentes métodos de pretratamiento para acelerar la hidrólisis. Es importante recalcar que existen diferentes tipos de pretratamientos y estos están asociados a un costo energético y económico. Por ende, el proceso de digestión anaerobia debe ser un sistema donde la producción de biogás y el ahorro del costo de operación sean lo suficientemente compensados tanto en el balance energético como en el económico [38]. Los pretratamientos tienen como objetivo modificar la estructura compleja de los materiales celulósicos presentes en el residuo, para así reducir el grado de polimerización del mismo y poder debilitar los enlaces de lignina y carbohidratos, incrementando sustancialmente el área de contacto de los componentes celulares inmersos con el fin de evitar ataques de microorganismos que intervienen en el proceso degradativo [39]. Dicho eso, y contemplando los diversos pretratamientos expuestos en el artículo “Utilización de pre-tratamientos básicos y específicos para la producción de biogás. Revisión y análisis”, se optó por la utilización de un pretratamiento mecánico, el cual se centra principalmente en la reducción del tamaño de las partículas y también en la alteración de la estructura morfológica, con el fin de garantizar y mejorar la ruptura en la pared celular, provocando así un mejor ataque de los microorganismos encargados de la degradación por etapas de los compuestos y por ende una mayor velocidad y eficiencia en la hidrólisis [39]. Se evidencia que un 53% de los residuos alimentarios, aumentó la producción de metano en un 28%. Por el contrario, la reducción excesiva del tamaño de partícula favorece la acumulación de AGV y redujo el rendimiento de biometano [7].

Este método es uno de los más económicos en comparación a pretratamientos físicos, térmicos, ultrasónicos, químicos, biológicos y combinados, ya que estos hacen uso de equipos bastantes complejos y tiene inmersos cultivos microbiológicos que sin lugar a dudas aumentarían los costos del proyecto. Para efectuar el proceso, se propone utilizar un molino de cuchillas, debido a que este equipo es considerado como óptimo para realizar los cortes requeridos para efectuar la extracción de aceites esenciales, como para la materia prima ingresada al biodigestor.

La 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 [40]. A su vez, es totalmente necesario reportar esta reducción de partícula debido a que cuando existen reacciones en fase sólida, el tamaño de partícula rige todo el proceso de transferencia de masa que hay internamente en el proceso. Para garantizar esta disminución de tamaño, es necesario que las partículas pasen por un tamiz después del proceso de molienda antes de ser ingresadas al primer reactor con el fin de asegurar que el tamaño de partícula esté dentro del intervalo. Ambos reactores deben contar con este parámetro, sin embargo, en el primer reactor se va a controlar y asegurar este tamaño de partícula. En cambio, en el segundo reactor al ser esta variable producto o resultado del tamaño de partícula obtenido en el primer biodigestor, este no será un parámetro controlado ya que responderá a la reducción obtenida inicialmente y, por ende, debe ser reportada.

Por otra parte, este pretratamiento no afecta las condiciones de pH, sólidos totales y sólidos volátiles. Además, el porcentaje de lignina disminuye proporcionalmente con la reducción del tamaño de las partículas de desecho, por lo que las partículas de menor tamaño mejoran la transferencia de masa. De igual forma, disminuye la concentración de la fibra ácida detergente (parte de la pared celular compuesta por celulosa ligada a lignina) y mejora la digestibilidad. El tratamiento mecánico mejora fuertemente la actividad hidrolítica de los consorcios microbianos en la etapa inicial. Este efecto se puede atribuir al aumento del área superficial a menor tamaño de partícula, lo que permite una mejor interacción, produciendo menores cantidades en concentraciones de AGV [41].

3.2.2. *Velocidad de carga orgánica*

La velocidad de carga orgánica (VCO) se refiere esencialmente a la cantidad de materia orgánica ingresada diariamente al biorreactor por unidad de volumen. Esta es totalmente dependiente de la concentración del sustrato y del tiempo de retención que se haya fijado a lo largo del proceso. Cuando el sistema se encuentra en ausencia de cualquier tipo de inhibidor y presenta altas cargas orgánicas, estas proporcionarán elevadas producciones de biogás, aunque se debe tener en cuenta que se pueden presentar riesgos asociados a sobrecargas puntuales que pueden desencadenar en la acidificación del biorreactor.

3.2.3. *Temperatura*

La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. 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 [2].

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos, los cuales se evidencian en tabla 6, “sección 1.3.1. Temperatura”. Sin embargo, teóricamente se señalan diferentes ventajas y desventajas que pueden suceder en los diferentes rangos que influyen en la fase experimental. El primero es el rango psicrófilico, se caracteriza por bajas velocidades de crecimiento de los microorganismos de modo que es poco viable debido al gran tamaño del reactor necesario para desarrollar el proceso de manera eficiente. Una ventaja es que presenta menores problemas de estabilidad que en los otros rangos de temperatura de operación. El segundo rango es el mesófilo, consta de una mayor tasa de crecimiento específico, este maneja una mayor velocidad del proceso, lo que implica un aumento en la eliminación de organismos patógenos comparado con los otros dos rangos, pero suele ser más inestable a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta además mayores problemas de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga, comparado con el rango mesófilo. Cabe resaltar que, al necesitar un sistema con mayor requerimiento de temperatura, también aumenta el gasto energético, los costos de equipo y accesorios necesarios en el proceso [6].

Como se menciona en la sección “1.3. Factores determinantes en el proceso”, la temperatura influye en el tiempo de retención hidráulica debido a que, a medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos, disminuye el tiempo de fermentación del proceso y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás [2]. Se decidió trabajar en el rango mesófilo por las ventajas mencionadas anteriormente y, debido a que se ajusta al tiempo de retención hidráulico determinado en la sección “3.2.5. Tiempo de retención hidráulico”, el cual se estableció en 30 días, teniendo como referencia la tabla 6.

Es indispensable destacar y tener en cuenta que para estos procesos de digestión anaerobia según el mismo autor mencionado anteriormente cuando se trabaja y opera a temperatura ambiente se pueden presentar varios inconvenientes en lo relacionado a la producción de biogás, ya que al trabajar a estas condiciones se puede dar lugar a fluctuaciones en el sistema, causando daños al estado fisiológico de los microorganismos presentes durante todo el proceso [6].

Según lo expuesto anteriormente, se puede inferir que lo más conveniente en un sistema de digestión anaerobia en dos fases es trabajar a temperaturas que se encuentren en un rango termófilo. Sin embargo, en la tabla 24 se pueden observar algunas desventajas e inconvenientes que se pueden presentar durante al proceso.

Tabla 24.

Desventajas del proceso de digestión anaerobia al trabajarse en rangos termófilos de temperatura.

Principales desventajas al trabajar un sistema de digestión anaerobia en dos fases en un rango termófilo de temperatura.	Al generar en el sistema una carga mayor de temperatura, directamente hay un alto gasto de energía durante el propio proceso, lo que puede significar en el desaprovechamiento energético del biogás para otros usos.
	El dimensionamiento de los equipos tales como accesorios, válvulas y tuberías son ligeramente más costosos al trabajar con temperaturas termófilas, queriendo decir que el costo asociado al mantenimiento será igual de elevado.
	La atención y el cuidado que se le debe tener al es considerable ya que los microorganismos que predominan a estas temperaturas son más susceptibles a ligeros aumentos de concentración de materia y carga orgánica, cambios de temperatura y cantidades de tóxicos en el residual, comparado a los microorganismos que trabajan a temperaturas mesófilas.
	En sistemas residuales con concentraciones elevadas de nitrógeno pueden alcanzarse valores tóxicos y peligrosos de amonio, ya que dicha concentración se incrementa velozmente al aumentarse la temperatura, siendo esta la repercusión tóxica del nitrógeno para los microorganismos anaerobios.

Nota. La tabla presenta las principales desventajas del proceso de digestión anaerobia en dos fases al trabajar en rangos termófilos de temperatura. Información extraída de: “La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I”. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Ciudad de la Habana, Cuba. 2005 [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf> [Último acceso: 17 abril 2022]

Una vez expuestas las ventajas y desventajas que puede tener el proceso en los diferentes rangos de temperatura, los artículos expuestos en la tabla 23 prefieren manejar temperaturas mesófilas. Por lo que se decidió trabajar en rangos mesófilos, los cuales se ajustan mejor a las condiciones de operación necesarias, mostradas en la tabla 25.

Tabla 25.

Intervalos de temperatura de operación.

Tipo de etapa	Intervalo de temperatura (°C)	Temperatura óptima (°C)
Etapa de hidrólisis y acidificación (Reactor 1)	Mesófilo (10°C - 47°C)	37°C -39°C
Etapa acetogenesis y metanogénica (Reactor 2)	Mesófilo (10°C - 47°C)	37°C -39°C

Nota. La tabla muestra los intervalos de temperatura de operación para cada etapa del proceso.

3.2.4. Agitación

En el sistema de digestión anaerobia cuando se hace referencia al termino de agitación, esencialmente se busca dar cumplimiento a los siguientes objetivos que resultan en una disminución del tiempo de residencia de los microorganismos en el caldo de cultivo con el fin de aumentar exponencialmente la producción de biogás. Entre esos objetivos se destacan: remover la mayor cantidad de microorganismos producidos por las bacterias metanogénicas, evitar a toda costa la formación de intersticios “muertos” sin ninguna actividad biológica los cuales reducirían considerablemente la capacidad del volumen efectivo del reactor, mezclar la mayor cantidad de sustrato fresco con la población bacteriana presente en el sistema y prevenir de manera eficaz la formación de espumas y sedimentación de partículas en el reactor [2].

Una constante agitación en el sistema incrementa la producción de biogás y disminuye sustancialmente el tiempo de retención hidráulico ya que, en la configuración del sistema, la frecuencia e intensidad de la agitación debe considerarse como un equilibrio entre todo el mix de bacterias presentes. La ruptura de este equilibrio en donde un metabolito específico sirve como alimento y base para el siguiente en una determinada etapa del proceso, causará una merma significativa en la actividad biológica del sistema y por consiguiente una reducción en la producción y síntesis de biogás.

En la tabla 26 se presentan los 3 tipos de agitación más comunes en este proceso, en donde se especifica la funcionalidad y configuración de los mismos.

Tabla 26.

Tipos de agitación más comunes.

Tipo	Especificación
Mecánico	Consta de agitadores manuales o motores eléctricos
Hidráulico	Es operado a través de bombas de flujo lento en donde se hace recircular la biomasa
Turbulencia	Se hace recircular el lixiviado producido en la parte inferior del reactor por medio de una tubería o cañería, con el fin de producir una turbulencia por medio de la inyección de lixiviado y de esta manera efectuar un movimiento constante de la biomasa

Nota. La tabla presenta los tipos de agitación más comunes. Información extraída de: M. T. Varnero, “Manual del biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Santiago de Chile, Chile,.” 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>. [Último acceso: 17 abril 2022].

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente y lo evidenciado en la tabla 23, en la mayoría de sistemas analizados por diversos autores se utilizan mecanismos con agitación por turbulencia o de inyección de lixiviado ya que este garantiza y aumenta la producción de biogás y además disminuye considerablemente el tiempo de retención hidráulico. A su vez, se garantiza una distribución uniforme de la temperatura y del sustrato en el interior del biodigestor, también de los productos tanto intermedios como finales, dejando en claro que el fluido a trabajar y el lixiviado no presentan condiciones de viscosidad alta y el tipo de sustrato pertenece a la clase 1, en donde puede degradarse de manera eficaz en digestores del tipo Batch. Este sistema proporciona mayor contacto entre el sustrato y el medio bacteriano, evitando así la formación de cúmulos alrededor de las bacterias. Finalmente, este tipo de agitación evita la acumulación progresiva de lodo en la parte superior de biorreactor, impidiendo la formación de espuma en la superficie, dificultando seriamente la salida del biogás.

El método de agitación por inyección de lixiviado consiste esencialmente en agitar el líquido que es introducido por la parte inferior del biodigestor, aumentando el área de contacto entre la superficie y la solución lixivante con el fin de obtener recuperaciones más altas en tiempos más cortos [42]. Esta técnica incrementa considerablemente la producción de biogás y evita la sedimentación de partículas lo que causaría la formación de espumas y/o lodos. La agitación por

lixiviación es considerada como un tipo de agitación mecánica, la cual es efectuada por medio de rotores (hélices o paletas planas) que se encuentran en el fondo del tanque y permite una agitación continua de la biomasa presente en el caldo de cultivo [42]. A su vez, este mecanismo mantiene el lixiviado en suspensión hasta lograr una disolución completa.

El sistema de agitación por inyección de lixiviado favorece la cinética de reacción ya que en esta intervienen factores determinantes para el proceso como lo son la temperatura y la misma agitación, permitiendo el uso de reactivos oxidantes altamente agresivos. A su vez esta técnica de agitación tiene una serie de ventajas en términos de una alta recuperación del elemento de interés, también su cinética de extracción trabaja a elevadas velocidades y se puede trabajar de manera continua con alternativas de automatización de la línea de producción [42].

3.2.5. Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención hidráulico (TRH) y la velocidad de carga orgánica están estrechamente relacionados al ser designados como parámetros del volumen de sustrato orgánico que es cargado diariamente al biodigestor. Este valor tiene una relación inversamente proporcional con el tiempo de retención, debido a que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención. Por otra parte, el tiempo de retención hidráulico junto con la velocidad de carga orgánica la cual es determinada por el tipo de sustrato, son los parámetros principales del diseño de reactor ya que ellos definen la capacidad y el volumen que tendrá el digestor [2].

Teniendo en cuenta la fundamentación teórica del sistema y el proceso natural de la actividad biológica, las bacterias requieren de un tiempo específico para poder degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran medida de la incidencia de la temperatura, ya que entre más alta sea, menor será el tiempo de fermentación o retención para obtener una carga elevada de producción de biogás [2].

El tiempo de retención hidráulico varía dependiendo de la configuración y el tipo de biodigestor que se esté empleando. Por ejemplo, en un biorreactor que opera en un régimen discontinuo o estacionario, el tiempo de retención es igual al transcurrido entre la carga de la operación de la descarga de la misma. Por otra parte, en un sistema donde el régimen del proceso es efectuado de

manera semicontinua o donde la carga es alimentada diariamente, el tiempo de retención es quien determinará el volumen diario de alimentación que se necesita ser cargado al biodigestor, evidenciado en la ecuación 4 expresada a continuación:

Ecuación 4.

Volumen de carga diaria para un sistema semicontinuo

$$\text{Volumen de carga diaria } \left[m^3 / \text{día} \right] = \frac{\text{Volumen del biodigestor } (m^3)}{\text{Tiempo de retención } (\text{día})}$$

Entonces se puede inferir que según la ecuación presentada anteriormente y teniendo en cuenta los lineamientos expresados por la autora María Teresa Varnero, para un tiempo de retención de 30 días, cada día se carga 1/30 del volumen total del digestor, y en promedio los residuos orgánicos y la masa microbiana permanecen 30 días dentro del sistema [2]. A su vez, la producción total de biogás dependerá esencialmente de la cantidad de residuos alimentados o cargados diariamente al sistema, que por lo general se trabaja con “tiempos de retención entre 20 y 55 días y con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico de digestor”. Es por esto que, entre menor sea el tiempo de retención durante el proceso, el tamaño del biodigestor y los costos de operación se reducirán proporcionalmente al mismo.

Dicho eso y según lo expresado en la tabla 23 donde se efectúa una comparación de diversos artículos en los cuales se exponen las principales condiciones de operación, el tiempo de retención hidráulico promedio oscila entre 15 a 40 días, es por eso que para fines de este trabajo de grado se tomará como referencia ese intervalo de tiempo para analizar el sistema de digestión anaerobia en dos fases.

Igualmente, se encontró que para codigestiones efectuadas a partir de residuos orgánicos y excretas animales, el tiempo de retención hidráulico más utilizado y con mejores resultados es alrededor de 30 días, ya que valores de TRH superiores a este, se evidenció una disminución en la producción de biogás. A su vez, Escárraga y Espinosa en sus tesis [19] efectuaron el cálculo del TRH mediante la siguiente ecuación, donde evalúan la codigestión de residuos cítricos junto con excretas animales.

Ecuación 5.

Tiempo de retención hidráulico

$$TRH = -51.227 \ln(T^{\circ}C) + 206.72$$

Utilizando la ecuación anterior y con una temperatura establecida de 37 °C, se define un tiempo de retención hidráulico para el sistema de 30 días.

3.2.6. pH

Los efectos del pH se reflejan en la actividad enzimática de los microorganismos y su estabilidad. Las formas generales en que el pH influye en la actividad microbiana son en los cambios de los grupos hidrolizables de las enzimas (grupos carboxilos y aminas), la alteración de los compuestos no enzimáticos del sistema (ionización del sustrato, desnaturalización de la estructura proteica de la enzima). A estos efectos del pH deben adicionarse la concentración de H⁺ que influye sobre las diferentes reacciones químicas, bioquímicas y biológicas que ocurren en este sistema. Se plantea en general que el valor óptimo de pH para la digestión anaerobia es 7. En la práctica se ha visto que, al alejarse de este valor, la eficiencia del proceso disminuye, aunque se ha comprobado que para valores fuera del rango el proceso no se inhibe hasta cierto valor particular [6].

Las bacterias fermentativas pueden funcionar de manera eficiente en un amplio rango de pH, es decir, entre pH 4.0 - 8.0 mientras que las bacterias metanogénicas son funcionalmente activas dentro de un rango de pH de 6.5 - 7.5. Cabe mencionar que el pH bajo, en particular el pH 4.0, favorece la producción de ácidos grasos volátiles, especialmente el ácido acético, propiónico y butírico, mientras que un pH más alto, es decir, un pH 8, favorece la producción de amoníaco [7].

Según la tabla 23, muestra que diferentes autores trabajan en intervalos de pH de 5 - 6 para el reactor de hidrolisis e intervalos de 6.9 – 8 para el reactor de metanogénesis. A continuación, la tabla 27 muestra el rango de pH más favorable para cada etapa en este proceso de digestión anaerobia.

Tabla 27.

Intervalos de pH de operación.

Tipo de etapa	pH
Etapa de hidrolisis y acidificación (Reactor 1)	5.2 - 6.5
Etapa acetogenesis y metanogénica (Reactor 2)	6.5 - 7.2

Nota. La tabla presenta los intervalos de pH de operación para cada etapa del proceso. Tomada de: Srisowmeya G., Chakravarthy M., Nandhini G. “Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review”, noviembre 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109587> [Último acceso: 10 Marzo 2022].

Cabe resaltar que mantener la etapa acidogénica del proceso anaeróbico de dos fases a un pH de 5.5, se favorece exclusivamente la producción de ácido acético y es ventajoso ya que el ácido acético es un sustrato listo para la etapa metanogénica y los reactores de dos fases con etapa acidogénicas mesofílicas son más propensos a cambios de pH ya que esta condición favorece la producción de AGV totales [7].

Al trabajar con residuos de cáscara de naranja, limón y mandarina son frutos considerados ácidos, por lo que se debe agregar una sustancia que permita modificar el pH y lo ubique en el intervalo óptimo del reactor, evidenciado en la tabla 27. Varios autores afirman que la regulación del pH en un proceso anaerobio se pueden emplear diferentes métodos, tales como: La adición de álcali (fundamentalmente cal o sosa), la adición de ácido (orgánico o inorgánico), la adición de agua al residual al reactor, la disminución de la carga orgánica aplicada al proceso y la edición de ácidos grasos volátiles (AGV), ya que constituye el precursor principal de la metanogénesis [6].

Sin embargo, hay autores que señalan que las sustancias que ejercen un poder tampón impiden la caída del pH, esto ocurre cuando la alcalinidad del medio no es suficiente para la neutralización de los ácidos volátiles. Es de suma importancia la corrección del pH mediante la adición de productos químicos de tal forma que generen una capacidad de amortiguación del pH. Esta capacidad de amortiguación es denominada también capacidad buffer, la cual se refiere a la habilidad del reactor para resistir cambios en el pH [43].

Es por esto que el bicarbonato de sodio es una opción viable ya que es fácil de manipular, es bastante soluble y no reacciona con el CO_2 , también ejerce una acción amortiguadora. Este compuesto es considerado el principal suplemento de alcalinidad bicarbonatado y es el único producto que cambia suavemente el equilibrio del medio para lograr un valor deseado, sin alterar el balance fisicoquímico de la delicada comunidad biológica [44]. A su vez, al ser una sal formada por una base fuerte (NaOH) y un ácido débil (H_2CO_3) presenta las características necesarias para ser considerada como un agente alcalinizante la cual no solamente es útil para evitar una drástica caída del pH, sino también para aumentar la alcalinidad del medio. El bicarbonato de sodio se encuentra comercialmente en forma de polvo y su masa volumétrica oscila entre 800 a 1200 kg/m^3 [45].

Por otra parte, la adición de este tipo de sustancias alcalinizantes representa un aumento considerable de la materia orgánica en donde a mayor temperatura de operación en el sistema anaeróbico, se presentan mejores porcentajes de solubilización del material orgánico, reduciendo el tiempo de operación [32]. Cabe resaltar que, este pretratamiento alcalino remueve la lignina y parte de la hemicelulosa, es decir que se aumenta sustancialmente el acceso a la enzima de la celulosa, sabiendo que se pueden obtener diversos compuestos aromáticos complejos como resultado del proceso degradativo de la lignina [32]. Debido a la influencia en los compuestos lignocelulósicos y al tener un tipo de agitación por inyección de lixiviado se está asegurando la completa homogeneidad del pH en toda la mezcla, es decir que el agente alcalinizante al estar en fase sólida puede disolverse de manera uniforme en el sustrato fresco y no tener riesgos asociados a coagulaciones ni sedimentación de partículas debido a la estructura morfológica de las partículas presentes en el caldo de cultivo en términos de su solubilidad y estructura interna.

Su viabilidad se debe a que cuando los ácidos volátiles aumentan, son neutralizados por la alcalinidad al bicarbonato. En este caso, la alcalinidad total es debida a la alcalinidad al bicarbonato y a los ácidos volátiles. Cuando la alcalinidad debida a los ácidos volátiles supera la alcalinidad debida al bicarbonato, el sistema se inestabiliza, pudiendo sufrir sensibles caídas del pH con cualquier nuevo aumento de los ácidos volátiles. Aunque el proceso anaerobio consta de cuatro etapas, la más sensible es la metanogénica, en la cual las bacterias consumen los ácidos de cadena corta (acetato). Si la tasa de producción de AGV es mayor que la tasa de consumo por las bacterias

metanogénicas ocurre una acumulación de AGV en el reactor que provocaría su acidificación si no hay capacidad buffer (alcalinidad bicarbonática) suficiente para neutralizarlos, y solo volverá a funcionar adecuadamente con adición externa de alcalinidad [43].

4. PROPUESTA DE DISEÑO

4.1. Metodología

Una vez evaluadas las propiedades de los residuos de las cáscaras de naranja, mandarina y limón, y determinadas las condiciones de operación para el sistema de digestión anaerobia, se procede a proponer el esquema completo donde se evaluarán los reactores, conexiones y método de cuantificación de biogás.

4.2. Desarrollo

El objetivo de este proyecto de grado es proponer un diseño de digestión anaerobia en dos fases mediante un sistema discontinuo a escala laboratorio. El proceso se puede evidenciar en la figura 14, donde inicia con la recepción de las materias primas, para luego realizar los pretratamientos estipulados en la “sección 3.2.1 Tamaño de partícula”. También se dispondrá de un tanque de mezcla con el fin de realizar la proporción adecuada correspondiente de las cascaras junto con el estiércol.

Posteriormente, por medio de la tubería y una válvula se ingresa la mezcla al primer biodigestor, donde ocurre la etapa de hidrólisis y acidogénesis, en esta primera etapa se debe garantizar el intervalo de temperatura adecuada y agitación. A su vez, en lo relacionado a la formación de ácidos se tienen condiciones de pH que oscilan entre 5.2 a 6.5 con el fin de asegurar tiempos de retención de sólidos bajos y favorecer el crecimiento de bacterias acidogénicas que de igual manera garanticen la producción de ácido en el interior del biodigestor. Por otra parte, posee una tubería y una válvula donde el fluido ingresa al segundo reactor. Además, en la parte superior posee una tubería por donde sale hidrogeno.

El segundo biodigestor recibe el fluido del primer reactor donde se desarrollan las etapas acetogénica y metanogénica, donde también se debe contar con un sistema que mantenga la temperatura de manera constante dentro de los intervalos óptimos y agitación. Esta segunda fase consiste esencialmente en la formación de metano, allí se tienen intervalos de pH de 6.5 a 7.2 con el fin de favorecer el crecimiento de bacterias metanogénicas, las cuales transforman los ácidos a

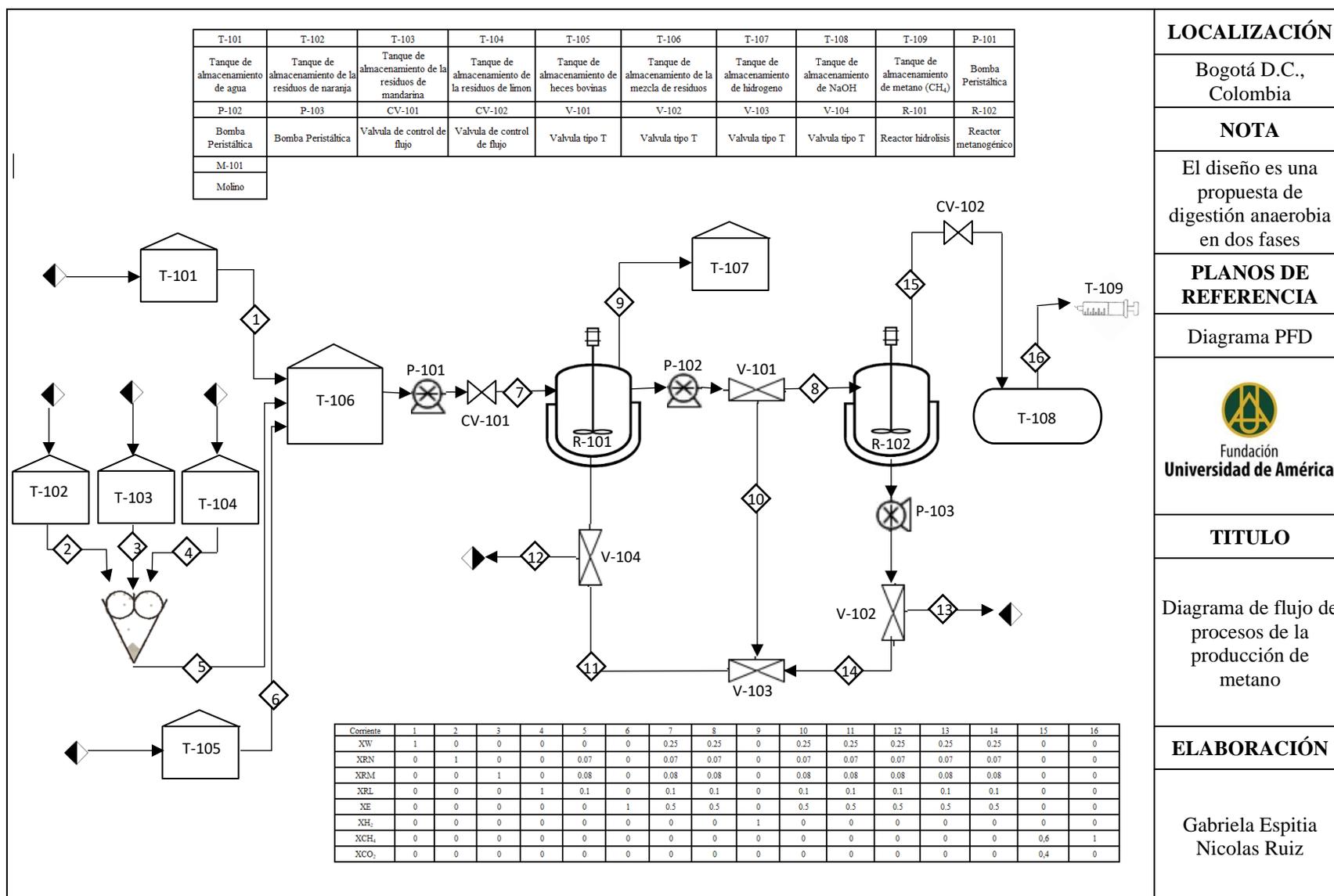
metano y mejoran sustancialmente a partir de una alta eficiencia la producción de biogás. Por otro lado, en la parte superior se cuenta con una tubería que conecta con la tubería del primer reactor por donde sale el biogás.

En otro orden de ideas, para la cuantificación del biogás se tuvo en cuenta lo expuesto en el primer capítulo. Se evidencia que el mejor método es el cromatográfico, pero este representa altos costos por lo cual se propone una cuantificación volumétrica debido a su bajo costo y una medición directa de cantidad de metano.

El proceso mencionado anteriormente y descrito en la figura 14, se tuvo en cuenta el tipo de proceso, la estructura de entrada y salida, la estructura de reactores y reciclo. De igual forma, se tomó en cuenta los siguientes parámetros, los cuales son considerados como heurísticas de diseño de procesos:

1. Primero seleccionar las materias primas y evitar o reducir la manipulación y almacenamiento de sustancias tóxicas.
2. Las materias primas no requieren de ninguna purificación o eliminación de sustancias, ya que lo que se busca es aprovechar al máximo sus propiedades.
3. El proceso requiere de corrientes de purga y reciclo. La corriente de purga es con el fin de eliminar sustancias indeseables que se acumulan en el reactor y el reciclo es para mantener el nivel del volumen equilibrado en ambos reactores.
4. Las tuberías y accesorios deben ser elaborados con materiales capaces de soportar sustancias en descomposición, evitando fugas o pérdidas de materias primas y/o productos de interés. De igual manera, deben ser resistentes a altas temperaturas, sustancias corrosivas, sustancias gaseosas y líquidas.
5. Las distancias de los equipos y tuberías no requieren de una especificación mínima debido a que no se maneja con sustancias reactivas, corrosivas, peligrosas, ni tóxicas. Sin embargo, esta variable depende del lugar y espacio que se quiera desarrollar el experimento. También, este factor puede afectar los costos en el proceso.

Figura 14. Diagrama de flujo del proceso.



LOCALIZACIÓN

Bogotá D.C.,
Colombia

NOTA

El diseño es una propuesta de digestión anaerobia en dos fases

PLANOS DE REFERENCIA

Diagrama PFD



TITULO

Diagrama de flujo de procesos de la producción de metano

ELABORACIÓN

Gabriela Espitia
Nicolas Ruiz

Nota. Diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobia en dos fases

4.2.1. Tanques de almacenamiento y mezcla.

De acuerdo con el planteamiento del problema, la industria de cítricos mundial produce más de 120 millones de toneladas, de las cuales cerca de un 60% se consume en el mercado de productos frescos y el 40% es utilizado para la extracción, pero menos de la mitad del peso del fruto se extrae como zumo, quedando como residuos la piel o cáscara [44]. En Colombia, específicamente en el relleno sanitario Doña Juana se acumulan 6368 Ton al día de residuos sólidos [46], el 51.32% corresponde a residuos sólidos orgánicos y el 8.05% corresponden a residuos sólidos orgánicos cítricos [47], es decir, 513 Toneladas/día.

Debido a que el trabajo de grado es a escala laboratorio, las cantidades a trabajar son pequeñas. En el anexo C, se evidencia que la capacidad de los dos biodigestores propuestos son 12 kg y 20 kg, respectivamente. Sin embargo, para el primer biodigestor se determinó una capacidad de residuos del 72%, por ende, en total se necesitan 8.6 kg. El porcentaje se seleccionó teniendo en cuenta una revisión bibliográfica donde se debe contar con un espacio entre el gas y los residuos.

Por otro lado, se determinó las cantidades de cada residuo a utilizar. Cabe mencionar, que se estableció una relación 1:1 de sustrato/agua y 1:2 de sustrato/excretas. Por ende, los porcentajes de cada residuo son los siguientes:

Residuo de naranja → 7%

Residuo de mandarina → 8%

Residuo de limon → 10%

Excretas bovinas → 50%

Agua → 25%

Las cantidades específicas en kg, se determinaron de la siguiente manera:

$$\text{Residuo de naranja} = 8.6 \text{ kg} * 7\% = 0.61 \text{ kg}$$

$$\text{Residuo de mandarina} = 8.6 \text{ kg} * 8\% = 0.68 \text{ kg}$$

$$\text{Residuo de limon} = 8.6 \text{ kg} * 10\% = 0.86 \text{ kg}$$

$$\text{Excretas bovinas} = 8.6 \text{ kg} * 50\% = 4.3 \text{ kg}$$

$$\text{Agua} = 8.6 \text{ kg} * 25\% = 2.15 \text{ kg}$$

Inicialmente, se necesitan cinco tanques de almacenamiento (T-1, T-2, T-3, T-4, T-5) cuyo fin es la recolección del agua, los residuos de cascara de naranja, mandarina, limón y las excretas bovinas. Posteriormente, se requiere un tanque de mezcla (T-6) cuya función principal es almacenar la materia orgánica, tanto líquida como sólida que se va a ingresar al primer biodigestor. Este tanque debe contar con las proporciones mencionadas anteriormente y con los pretratamientos ya realizados.

Se propone que los tanques de almacenamiento y mezcla sean elaborados de polietileno de alta densidad (HDPE) con orientación vertical, como se observa en la figura 15. Posee características para conservar dicha materia prima y evitan la contaminación. Además, es un material inodoro, insípido, ligero, flexible, no tóxico y resistente a bajas temperaturas. Por otro lado, no contiene soldaduras, son totalmente herméticos y tienen un refuerzo que soporta sustancias densas, incluso, con un alto nivel de corrosión [47]. Los tanques deben contar con la capacidad necesaria, por lo cual, se propone tanques de almacenamiento con intervalos de capacidad de 1 kg a 5 kg para los residuos y para el tanque de mezcla, se propone un volumen de 10 L.

Figura 15.

Modelo de tanque de almacenamiento y mezcla.



Nota. La figura representa el modelo comercial de los tanques de almacenamiento y mezcla a emplear. Imagen extraída de: Sunbox “Catálogos online” 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.sunbox-online.com/>. [Último acceso: 31 Mayo 2022]

4.2.2. Primer biodigestor

Una vez efectuado el proceso de recepción de los desechos orgánicos y su respectiva disposición en los tanques de almacenamiento y mezclado respectivamente, se continua con el diseño de los biodigestores para la obtención de biogás mediante un sistema de codigestión. Por medio de una bomba de desplazamiento positivo que en este caso puede ser una bomba peristáltica, la cual sea capaz de proporcionar un caudal estable a los dos biorreactores y que cumpla con los requerimientos de diseño y eficiencia del proceso, se hará ingresar la mezcla al primer biodigestor donde se producirá el contacto del consorcio de microorganismos anaeróbicos con el sustrato fresco que trae consigo la mezcla reactiva [48]. Como se mencionó anteriormente en este reactor las etapas hidrolíticas y acidogénicas tienen lugar, calentando y agitando la mezcla dentro de él. La comunicación con el segundo reactor se hará mediante una conexión por tubería y el fluido será impulsado de igual manera a partir de una bomba peristáltica. Para este caso se implementará una válvula de control de flujo, de la cual drenará por tubería parte del flujo para la purga y la otra como producto de recirculación al sistema. De la parte superior del reactor saldrá hidrógeno para su posterior tratamiento.

La configuración de este reactor debe proveer un equilibrio dinámico entre los consorcios bacterianos, no solamente relacionando aspectos operativos ni de condiciones de operación, sino también en términos de su fisiología y su cinética de crecimiento, lo que conllevaría indudablemente a un diseño mucho más específico y acorde con el sistema que se está trabajando [32]. En un diseño del proceso en una sola fase, implicaría que el pH y la tasa de carga orgánica (TCO) sean ajustados para que los consorcios bacterianos que operen en la etapa metanogénica sean más favorables. Sin embargo, al proponer una secuencia del proceso en dos fases, esto implicaría, un mejor enriquecimiento y selección de diversas bacterias inmersas en cada una de las etapas, permitiendo que la materia orgánica se degrade principalmente en ácidos grasos volátiles (AGV). A su vez, se incrementa la estabilidad del proceso en donde controlando la etapa acidogénica se puede prevenir una sobrecarga del reactor, y así garantizar una solidez constante en la etapa metanogénica la cual se realizará cuando pase al segundo reactor [32].

La selección y dimensionamiento de los reactores a emplear durante el proceso de digestión anaerobia se regirá bajo lineamientos empleados y reportados por diversos autores, en donde partiendo de una exhaustiva revisión bibliográfica de artículos y tesis que emplearon condiciones

de operación similares entre sí y que todos estén bajo la premisa de trabajar a escala laboratorio, se tomarán como referencia para elaborar la propuesta de diseño. Sin embargo, estos son tomados como una base de referencia para efectuar el diseño más acorde a este trabajo de grado, el cual permitirá proyectarlo posteriormente a una posible escalación a nivel planta piloto con las bases obtenidas.

Inicialmente, en lo relacionado al diseño del primer reactor se tuvo en cuenta el régimen de carga o llenado del mismo, en donde se eligió operar de manera discontinua o Batch, principalmente debido a que este sistema es utilizado para producciones pequeñas de biogás, ideal para esta propuesta de trabajo de grado ya que como se mencionó anteriormente se analizará únicamente a escala laboratorio. Es por esto, que el régimen continuo quedo descartado ya que este es un modelo utilizado para la obtención de volúmenes considerables de gas. Este tipo de biodigestores discontinuos son cargados una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que se ha dejado de producir biogás, pero se debe tener en cuenta que no se descarga completamente, solo se retira cierta cantidad, esto con el fin de producir el biogás de las cargas subsecuentes en menos cantidad de tiempo debido a la presencia de la mezcla ya fermentada y por ende la aceleración de la obtención del biogás [48].

Los biodigestores de tipo Batch son relativamente fáciles de construir y también son ideales a nivel de laboratorio ya que son aptos para evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico en la mezcla a analizar. Para que estos operen de forma correcta, deberán ser herméticos, con el fin de evitar la entrada de aire y fugas del biogás producido y tener un fácil acceso para su mantenimiento ya que esencialmente consisten en un tanque con una salida de gas conectada a un sistema de recolección o medición de gas. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, para la construcción del biodigestor en cuanto al material se refiere, se elige polietileno de alta densidad (HDPE) principalmente por sus bajos costos de adquisición e instalación, resistencia a altas temperaturas, resistencia a sustancias altamente corrosivas y densas, capacidad de tener una larga vida útil y al ser considerado como un material altamente elástico y flexible.

Tomando como referencia la tesis de doctorado “Digestión anaerobia en dos fases de los residuos de cebolla blanca (*Allium cepa*) y desarrollo de un modelo lineal adaptativo predictivo” la configuración de este primer biodigestor puede catalogarse como un reactor de lecho fluidizado el

cual dispone de una película totalmente fija donde la biomasa tiende a lavarse a causa de la gran velocidad del flujo ascendente. Con el fin de favorecer la producción de biogás, el reactor podrá ser empacado con aros de PVC de ½ pulgada de diámetro con el fin de aumentar el espaciado al interior del lecho y facilitar el fenómeno de percolación del lixiviado y servir como soporte a la materia orgánica a degradar [32]. De igual forma, se puede incorporar una placa cilíndrica agujereada la cual sirve como falso fondo para permitir el paso del lixiviado que trae consigo la solución rica en ácidos grasos volátiles y poder retener de manera efectiva los sólidos inmersos en la solución [32]. En la parte superior del reactor se acoplará un aspersor que irrigará el líquido recirculado sobre el sustrato presente en la solución y allí mismo se encontrará la salida del gas producido en la primera fase [32].

Como se mencionó inicialmente, se debe garantizar una constante agitación, sin embargo, la velocidad de agitación afecta directamente la producción de biogás ya que, si se somete el sistema a altas velocidades, estas pueden romper los agregados de bacterias y flóculos que se hayan formado a lo largo del proceso, disminuyendo así la cantidad de gas producido. Es por esto, que se propone una agitación por turbulencia o por inyección de lixiviado debido a las ventajas operativas presentadas en el capítulo anterior, en donde la corriente de flujo que parte del agitador, se mueve a través del líquido hacia una dirección determinada hasta que esta es desviada por el fondo o por la pared del tanque [49]. Estos agitadores se destacan por ser del tipo de flujo axial y radial debido al flujo que inducen en el tanque agitado, estos pueden operar a velocidades moderadas o elevadas entre 200 a 1450 rpm y es empleado para líquidos con una viscosidad media [50]. El lixiviado ingresado por la parte inferior del biodigestor se pondrá en contacto con el sistema de agitación mecánico operado por un mecanismo de rotores que impulsan de manera rotacional las hélices dispuestas en el tanque, estas mantendrán de manera constante la biomasa en suspensión hasta lograr la completa disolución de la mezcla en el líquido presente al interior del biorreactor, promoviendo la síntesis de las reacciones desencadenadas en la etapa fermentativa en términos de su cinética y de la temperatura de operación del reactor.

Según lo presentado en la contextualización teórica del proceso de digestión anaerobia, en la fase acidogénica o fermentativa se pueden presenciar condiciones de microaerofilia debido a la tolerancia a ciertas concentraciones de oxígeno de algunas bacterias facultativas. La presencia de las bacterias *Helicobacter pylori* y *Campylobacter sp* son considerados microorganismos

microaerófilos que inciden en el proceso de degradación de ácidos orgánicos de cadena corta para la obtención de ácido butírico y ácido propiónico. Dicho esto, se debe garantizar un entorno con baja concentración de oxígeno, alrededor de un 5% y una concentración de dióxido de carbono entre el 5% y el 10%. El control más efectivo que se puede efectuar es realizar periódicamente pruebas de estanqueidad para evitar fugas de gas y prevenir el ingreso de concentraciones de oxígeno no deseadas, sin embargo, como ya se mencionó, este reactor es totalmente hermético, por lo que una vez alimentado, se tapa y se sella. No obstante, cabe la posibilidad de que ingresen ciertas cantidades de oxígeno, pero al tener un tiempo de retención de 30 días este se degradará al pasar el tiempo.

Por otro lado, en lo relacionado a capacidad volumétrica neta se observa la tabla 28, donde se recopilan datos de dimensionamiento expresados por diversos autores, evidenciando que para escalas de laboratorio se tienen intervalos similares en los se puede diseñar y obtener resultados favorables acorde a los requerimientos. En lo relacionado al diámetro, el intervalo promedio según la literatura y teniendo en cuenta el volumen, oscila entre 12 a 20 cm. Por su parte la altura, tiene valores de referencia que rondan entre 16 a 25 cm.

Tabla 28.

Recopilación de los volúmenes netos teóricos para el primer biodigestor.

Volumen (L)	Referencia
3	[32]
2.3	[33]
2	[44]
1.5	[45]
2.5	[46]

Nota. La tabla muestra los volúmenes netos teóricos recopilados para el primer biodigestor.

El proyecto de grado se desarrolla a escala laboratorio, por ende, los equipos deben ser seleccionados de acuerdo al mercado que hay en el momento. Por medio de una revisión, se propone el uso de un tanque con un volumen total de 5 L, un diámetro de 19.2 cm y altura de 17.3 cm, el cual se observa en la figura 16 y sus especificaciones técnicas se encuentran en el anexo B. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el 72% de la capacidad máxima del recipiente se utilizará para la masa reaccionante y el 28% restante será el espacio libre para la liberación del gas producido. Dando como resultado un **volumen de reacción efectivo** o neto de 3.6 L y un **volumen**

para liberación de gases de 1.4 L. Este tipo de biodigestores deben contar con dos espacios esenciales: El primero es el almacenamiento del gas generado en el proceso y el segundo el almacenamiento de los residuos para efectuar el proceso correctamente.

Figura 16.

Modelo propuesto del primer biodigestor.



Nota. La figura representa el modelo ilustrativo comercial propuesto para el primer biodigestor. Imagen extraída de: Sunbox “Catálogos online” 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.sunbox-online.com/>. [Último acceso: 31 Mayo 2022]

4.2.3. Segundo biodigestor

En el segundo reactor se llevan a cabo las etapas acetogénica y metanogénica del proceso de digestión anaerobia, allí al igual que en el primer reactor se debe garantizar una temperatura y agitación constante con el fin de obtener el biogás necesario y evitar sedimentaciones o decantaciones de flóculos que interfieran y atasquen el sistema. De su zona superior parte un tubo con el biogás que comunica con el tanque de purificación y cuantificación de gas. En la parte inferior del reactor se encuentra un orificio de salida de digestato, donde parte de él podría ser recirculado a través de una bomba al primer o al segundo reactor, y otra parte será purgado con el fin de eliminar sustancias indeseadas que se acumulan en el flujo de recirculación [48].

El diseño de este segundo reactor debe proporcionar las condiciones necesarias para que los microorganismos metanogénicos consuman los intermediarios accesibles para poder producir metano, es decir un pH más elevado con respecto a etapas anteriores y un potencial redox bajo el cual garantice la formación de las bacterias productoras de metano. De igual forma, sabiendo de la sensibilidad al oxígeno, los microorganismos metanogénicos deben estar acondicionados y confinados a una pequeña selección de sustratos con el fin de avalar la producción de acetato, y

por ende el restante de la producción de metano. Para esta etapa del proceso al proponer un sistema anaeróbico en dos fases, se está generando una evolución significativa de las comunidades bacterianas en el tiempo de la etapa metanogénica, es decir a partir de la selección y caracterización de algunas especies dominantes asociados a la síntesis de metano. Por otra parte, se evidencia en este reactor metanogénico que especies de Bacteria y Archaea presentan concentraciones similares durante el transcurso del todo el proceso, queriendo decir que las concentraciones de las especies metanogénicas son mayores a las obtenidas en el reactor hidrolítico, dando como resultado una producción mucho más abundante del producto de interés.

Teniendo en cuenta lo especificado en el marco teórico, en esta segunda fase del proceso se tiene la presencia de Archaeas metanogénicas, las cuales morfológicamente representan un grupo de Archaeas anaerobias obligadas, es decir se debe garantizar un ambiente totalmente anóxico y con condiciones de anaerobiosis estricta. Para esto de igual forma se propone efectuar periódicamente pruebas de estanqueidad con el fin de evitar fugas de líquido y gas. A su vez, cabe resaltar que si por alguna razón llegan a ingresar trazas de oxígeno, este será completamente degradado debido al tiempo de retención hidráulico establecido de 30 días, garantizando su completa ausencia después del transcurso de algunos días. Al igual que el otro reactor, este será completamente hermético asegurando sus condiciones de sellado en todo momento y si se requieren realizar muestreos para medir la concentración de los lixiviados, estos serán efectuados por medio de un bypass acoplado a la tubería.

Para el dimensionamiento y diseño de este reactor se tuvo en cuenta las mismas condiciones de operación expuestas en el primer reactor, es decir, se empleará un régimen discontinuo el cual está controlado y funciona a partir de la carga alimentada al primer reactor y del efluente del mismo, también en lo referente al material de construcción del reactor se propone igualmente la utilización de polietileno de alta densidad (HDPE) debido a las características y condiciones expuestas anteriormente, las cuales favorecen y garantizan esencialmente la producción de biogás, teniendo en cuenta el tipo de sustrato que se ingresará y cómo se comporta este dentro del tanque en términos de contaminación cruzada con otras sustancias y corrosión, sabiendo que el material del HDPE evita a toda costa la formación de bacterias, hongos, y otros microorganismos dañinos que puedan alterar y/o modificar las condiciones dentro del biodigestor.

De igual forma, referenciando la tesis de doctorado “Digestión anaerobia en dos fases de los residuos de cebolla blanca (*Allium cepa*) y desarrollo de un modelo lineal adaptativo predictivo” se propone el diseño y la configuración de este biodigestor anaerobio con un puerto de entrada ubicado en la parte inferior del tanque que sirve para el ingreso del líquido y dos puertos de salida ubicados en la parte superior del reactor, donde uno de ellos será dispuesto para la salida del efluente y el otro para la liberación de gases [32]. Para mantener la temperatura mesófila de 37°C se puede hacer uso de un intercambiador de calor el cual disponga de un fluido de calentamiento (el más común es etilenglicol) y que esté conectado a un baño termostataado para preservar la temperatura en el intervalo óptimo [32].

Al igual que el reactor anterior, en la tabla 29, se pueden observar los datos arrojados por diversos autores en cuanto al volumen, diámetro y altura utilizados para un sistema a escala laboratorio, resaltando en este caso que el volumen efectivo para este reactor suele ser más grande debido al espacio que se deja libre para que el gas fluya dentro del biodigestor, es decir se tiene un volumen total del reactor metanogénico pero usualmente el volumen de trabajo es menor al total con el fin de garantizar ese espacio mencionado. Para este reactor, los diámetros promedios se encuentran en un intervalo de 16 a 20 cm y la altura entre 20 a 30 cm.

Tabla 29.

Recopilación de los volúmenes netos teórico para el segundo biodigestor.

Volumen (L)	Referencia
4	[32]
4.5	[33]
4.5	[44]
6	[45]
6	[46]

Nota. La tabla muestra los volúmenes netos teóricos recopilados para el segundo biodigestor.

A través de una revisión de artículos, se propone el uso de un biodigestor con un volumen total de 8 L, un diámetro 19.8 cm y altura de 26.5 cm, el cual se observa en la figura 17 y sus especificaciones técnicas se encuentran en el anexo 2. Al igual que el anterior biodigestor, este volumen únicamente representa la capacidad total del recipiente o tarro, ya que al considerar que el 72% de su capacidad máxima será dispuesta para el volumen de la masa reaccionante y el 28% para el espacio de liberación de gases, **el volumen neto o de reacción efectivo** será de 5.76 L y el

volumen de liberación o expansión de gases será de 2.24 L. Las dimensiones se encuentran dentro de los rangos expuestos anteriormente y se tuvo en cuenta una propuesta de acuerdo al mercado actual y esta disposición es con el objetivo de poder almacenar el gas producido sin generar sobrepresiones y evitar posibles accidentes.

Figura 17.

Modelo propuesto para el segundo biodigestor.



Nota. La figura representa el modelo ilustrativo comercial propuesto para el segundo biodigestor. Imagen extraída de: Sunbox “Catálogos online” 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.sunbox-online.com/>. [Último acceso: 31 Mayo 2022]

4.2.4. Válvulas

Para el sistema de digestión anaerobio descrito en la figura 14, se observan seis válvulas las cuales tienen la finalidad de regular, detener y/o dar paso al fluido, es decir se catalogan como válvulas de control de flujo. Esencialmente se eligen válvulas esféricas de 3 vías del tipo T las cuales son necesarias para realizar las diferentes combinaciones de recirculación, purga y paso de fluido a lo largo de toda la tubería del sistema, regulando el caudal y flujo necesario en cada línea a partir del control piloto producido por la presión diferencial a través de la placa de orificio instalada corriente abajo de la posición de la válvula, alcanzando un control preciso a cambios mínimos de presión [48].

Estas válvulas tipo T consisten básicamente de una combinación de la válvula de dos vías normalmente cerrada y de la válvula de dos vías normalmente abierta, configurada en un solo cuerpo y con una única bobina. A su vez, esta válvula de bola o esfera, tiene un mecanismo para regular el flujo de un fluido que se encuentra canalizado y se caracteriza por poseer un mecanismo

regulador que se encuentra situado en el interior y tiene forma de esfera perforada, también dentro de la válvula está situado un macho esférico agujereado que controla la circulación del líquido o fluido, por lo tanto, este tipo de válvulas son ideales y representan una opción bastante viable en cuanto al sellado, ya que la bola contacta de forma circunferencial y uniforme la pared de la válvula, garantizando un sellado casi perfecto evitando el paso de flujo cuando se desee [51].

4.2.5. Bombas

Como se mencionó inicialmente, con la finalidad de impulsar la mezcla reactiva a lo largo de todo el sistema anaeróbico, se propone la utilización de 3 bombas de desplazamiento positivo, que en este caso pueden ser del tipo peristálticas. Estas son categorizadas como elementos hidráulicos que permiten el desplazamiento de diversos tipos de fluidos, dichos fluidos son contenidos en un tubo flexible que tiene forma de “C” en la parte interna de la cubierta. Esta bomba trae incorporado una pareja de zapatas o rodillos que aprietan el tubo, y mediante un movimiento rotacional va moviendo o impulsando el fluido del interior del tubo [52]. Por otro lado, sabiendo que es fundamental determinar qué tipo de bomba es la más adecuada dependiendo del proceso que se quiere llevar a cabo, las bombas peristálticas son un elemento muy útil y versátil que permite una adopción determinante a ciertos fluidos, es por esto que, su uso se destaca en los sectores de la minería, tratamiento de aguas y todo proceso que incluya sistemas biológicos [52].

Específicamente para este proceso, se elige utilizar bombas peristálticas de baja presión las cuales operan a no más de 8 bar, destacándose por la utilización de rodillos y la no incorporación de tubos reforzados en su estructura interna, por lo que suelen ser conocidas como “bombas de tubo”. Además, estas cuentan con cubiertas secas que, a diferencia de las bombas peristálticas de alta presión, no utilizan lubricante para prevenir el abrasamiento. Las principales ventajas de utilizar esta clase bombas a nivel industrial y más específicamente en los procesos que tienen inmersos microorganismos, es que son capaces de manejar fluidos abrasivos como ácidos, lodos, sólidos en suspensión y líquidos densos o viscosos, también este tipo de bombas peristálticas no cuentan con válvulas u otros elementos asociados al cierre, por lo que es prácticamente imposible tener fugas de fluidos corrosivos, y por ende el fluido no tocará partes móviles de las bombas [52]. A su vez, al no existir posibles riesgos de contaminación es posible utilizar estas tecnologías de bombeo para trabajar con productos alimenticios y sistemas de procesos biológicos, ya que se puede garantizar un ambiente totalmente estéril y libre de cualquier amenaza aséptica. Por último, estas bombas

requieren un mínimo de mantenimiento, este suele ser extremadamente rápido y sencillo, y además económico comparado a otros sistemas de bombeo ya que la única pieza que se podría enfrentar a un posible desgaste sería la manguera [52].

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, la misión de estas bombas es proporcionar un caudal estable y constante a los dos biodigestores. Como los reactores no son de gran tamaño ya que fueron acondicionados para operarlos a escala laboratorio y los tiempos de residencia serán altos, las bombas deberán poder suministrar volúmenes bajos. La bomba elegida es de la marca Watson-Marlow modelo 120D/DV, apta para aplicaciones específicas de laboratorio y capaz de manejar caudales entre 0.001 a 170 ml/min a 30 psi (2 atm), a su vez cuenta con una velocidad de motor de 1 a 200 rpm y con un cabezal de bomba con tapa abatible [53].

4.2.6. Tuberías

Las tuberías del sistema deben tener propiedades óptimas para que las sustancias fluyan de manera adecuada, sin fugas ni contaminación. Se propone el uso de tuberías no metálicas, tales como las plásticas de policloruro de vinilo (PVC), debido a que presenta propiedades de alta resistencia a soluciones alcalinas, ácidas y otros fluidos corrosivos. Además, son resistentes a todo tipo de bacteria, algas y no presenta contaminación cruzada. Posee bajo peso frente a tuberías metálicas y se puede manejar temperaturas inferiores a 60 °C [54].

Por otro lado, según el manual técnico “Instalación y uso de biogás” señala características de las tuberías de PVC donde los diámetros dependen de su uso. De acuerdo a las entradas al reactor, recomienda 4” (10.16 cm) de diámetro para que se cargue al biodigestor la mezcla de los residuos. En cambio, en la parte superior propone una tubería de 1” (2.54 cm) de diámetro por donde sale el biogás que producirá el biodigestor [55].

4.2.7. Recolección del gas

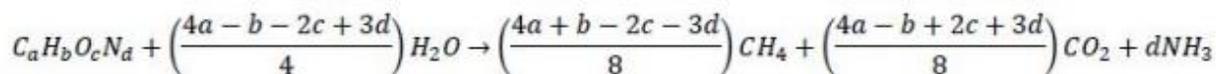
La cuantificación del gas se efectuó a partir del método volumétrico para la determinación de metano en el biogás. Este método volumétrico consiste esencialmente en determinar la cantidad de metano que hay dentro del gas generado en la etapa metanogénica, mediante el desplazamiento de un volumen de agua después de haber sido inyectada una muestra gas de volumen conocido [19]. Dicho proceso de recolección consta de dos tanques: El primero de ellos corresponde al

tanque de purificación (T-8) donde previamente la muestra fue introducida y se pone en contacto con una solución alcalina desplazante, la más común es el hidróxido de sodio (NaOH) a una concentración 1N y un pH superior a 12, esto con el fin de garantizar la captura de las trazas de CO₂ [16]. Luego, el metano (CH₄) queda en la parte superior del tanque y es dirigido al tanque de recolección y medición (T-9) en donde se mide la cantidad de agua desplazada por el gas y mediante el cociente de estos dos resultados (volumen desplazado/volumen de muestra) se obtiene la composición de metano en el gas.

Sin embargo, para realizar el dimensionamiento de los tanques es necesario conocer la cantidad de biogás a producir. Esta se determinó por medio del modelo de Buswell, el cual tiene como finalidad la predicción del rendimiento de biogás y se basa en la composición química elemental de la materia orgánica a utilizar. Se debe tener en cuenta que este modelo es completamente ideal bajo la suposición de que toda la carga orgánica es transformada en metano y no tiene en cuenta el crecimiento microbiano, es decir que, funciona como una aproximación teórica para el cálculo del potencial de producción de metano [19]. La estimación de la cantidad de biogás producido se enfoca en la estequiometría de la reacción representada como una reacción redox balanceada en la cual los productos de la digestión anaerobia son metano, dióxido de carbono y amoníaco [56].

Figura 18.

Estequiometría del biogás.



Nota. La figura evidencia la estequiometría del biogás en términos de su reacción redox. Tomada de: Baquerizo, R., Pagés, J., Pereda, I. “El modelo de Buswell. Aplicación y comparación. Principales factores que influyen en su aplicación” 2016 [En línea]. Disponible en: <https://www.virtualpro.co/files-bv/20160101/20160101-019.pdf> [Último acceso: 28 Mayo 2022].

donde a, b, c y d son los coeficientes estequiométricos de las moléculas biodegradables, donde solo se tiene en cuenta el carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno, los cuales se pueden determinar a partir de la ecuación 5. En este análisis se asume que todos los electrones donados son exclusivamente empleados para la energía metabólica, por lo que la síntesis celular no se toma en cuenta.

Ecuación 6.

Determinación de los coeficientes del modelo de Buswell.

$$\text{Coeficiente}_{a,b,c,d} = \frac{\text{Masa } \times \text{ Mezcla}}{PM_x * 2}$$

En la tabla 30, se muestran los coeficientes obteniendo y en el anexo C, se encuentra el procedimiento.

Tabla 30.

Valores teóricos de los coeficientes.

Coeficiente	Valor
a	1
b	5.39
c	0.51
d	0.03

Nota. En la tabla se observa los valores teóricos de los coeficientes estequiométricos para cada molécula.

Con el valor de los coeficientes, se determinó el rendimiento teórico de biogás (RTB), mediante la ecuación 6.y con las proporciones se evaluó el rendimiento teórico de metano (RTM) y el rendimiento teórico de dióxido de carbono (RTD).

Ecuación 7.

Rendimiento teórico de biogás.

$$RTB \left[\frac{m^3}{Kg_{sustrato}} \right] = \frac{22.415 a}{12 a + b + 16 c + 14 d}$$

Los datos obtenidos se encuentran en la tabla 31. De acuerdo con los resultados, se puede decir que la producción de biogás es de 0.86 m³ por cada kg de biomasa en el reactor. El biogás está compuesto de 60% metano y el 40% de dióxido de carbono [2].

Tabla 31.

Datos teóricos obtenidos de biogás y su composición.

RTB (m ³ /kg)	0.87
RTM (m ³ /kg)	0.52
RTD (m ³ /kg)	0.35

Nota. En la tabla se observa los rendimientos teóricos obtenidos y su respectiva composición.

Rodríguez y Criollo en su trabajo de grado [22], proponen el diseño de una planta de producción de biogás a partir de residuos de naranja utilizando un cosustrato de excretas bovinas. Los resultados teóricos que obtuvieron para el rendimiento teórico de biogás y metano fueron 0.86 m³/kg y 0.46 m³/kg, respectivamente.

Escárraga y Espinosa en su proyecto [19], desarrollaron una evaluación de obtención de biogás mediante la digestión anaerobia de residuos de fruta generados por una empresa de alimentos a escala laboratorio, a partir de excretas bovinas como inoculo. Ellos obtuvieron como resultado el potencial de producción de biogás y metano, con valores de 0.96 m³/kg y 0.51 m³/kg, respectivamente.

Mediante una comparación de los resultados obtenidos de los trabajos de grado mencionados anteriormente, se analizó con respecto a la primera tesis que los resultados no presentan mayor variación, existiendo una similitud en la producción de biogás y metano. Por otra parte, con respecto a la segunda tesis, se evidenció una mayor producción de biogás por parte de ellos, sin embargo, el rendimiento de metano es similar, por ende, su proceso tiende a una mayor generación de dióxido de carbono.

Finalmente, el dimensionamiento del tanque de captación de CO₂, se tuvo en cuenta que el hidróxido de sodio es una base y un álcali altamente corrosivo que puede descomponer las proteínas a temperaturas ambientales y causar graves quemaduras químicas. Por lo cual, su almacenamiento puede darse en tanques fabricados a partir de polietileno, el más común es el polietileno de alta densidad (HDPE) y el menos común es el polietileno reticulado (PEX). También

se suele almacenar en contenedores de acero al carbono, cloruro de polivinilo (PVC), acero inoxidable y plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP, con un revestimiento resistente [57].

A partir de lo anterior, se propone el uso de polietileno de alta densidad (HDPE) para ambos tanques. La capacidad debe ser proporcional a la cantidad total de biogás producido. La cantidad total de biogás equivale a 7.48 m^3 para un total de 8.6 kg de residuos, de los cuales 4.49 m^3 equivalen a metano y 2.99 m^3 a dióxido de carbono. Se propone un tanque de purificación con capacidad aproximada de 4 m^3 , con el fin de lograr contener la mayor cantidad de gas y no generar altas presión. El tanque de metano, se propone una capacidad de 6 m^3

CONCLUSIONES

A partir de análisis bibliográficos, se encontró que la biodigestión anaerobia en dos fases tiene ventajas asociadas al crecimiento y rendimiento de una mayor diversidad de Arqueas metanogénicas, las cuales aumentan hasta cinco veces más la producción de biogás en comparación a la secuenciación en una sola fase. A su vez, esta es una técnica prometedora que pretende mejorar la estabilidad y la producción de metano en el reactor que trata sustratos altamente biodegradables a mayor tasa de carga orgánica. Por otra parte, se concluye que el proceso en dos fases permite la selección y mejor enriquecimiento de las diferentes bacterias presentes, controlando las fases de acidificación del proceso con el fin de evitar sobrecargas y acumulación de material tóxico.

Mediante la elaboración de la matriz de selección ponderada, se estableció que una composición de 40% cáscara de limón, 32% cáscara de mandarina y 28% cáscara de naranja es la más adecuada y acorde a los parámetros de selección inherentes al proceso de digestión anaerobia, en donde se destacaron la disponibilidad del residuo, rendimiento global y características fisicoquímicas en el sustrato. Así mismo, se determinó la adición de un cosustrato (excretas bovinas) en una relación sustrato/excretas de 1:2 con el fin de elevar los niveles de nitrógeno en el sistema y garantizar una relación óptima de carbono/nitrógeno, disminuyendo la inhibición de microorganismos metabolitos del sustrato y asegurando la estabilidad del medio.

A partir de revisiones bibliográficas se seleccionaron las condiciones óptimas para efectuar el proceso de digestión anaerobia en dos fases, en donde los sólidos totales deben estar en un intervalo de 8 a 12%, una relación carbono/nitrógeno de 30:1, una concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) de 50-250 mg HAc/l, una humedad del 80 al 90%, una temperatura mesófila de 37 a 39°C, un tiempo de retención hidráulico de 30 días y valores de pH cercanos a la neutralidad en donde se manejaron intervalos de 5.2-6.5 en el primer reactor y de 6.5-7.2 en el segundo.

Se eligió operar el sistema de manera discontinua o con la utilización de reactores del tipo batch, principalmente debido a que esta configuración es utilizada para pequeñas producciones de biogás, lo cual es ideal para este trabajo de grado ya que se decidió evaluar el proceso únicamente a escala laboratorio. Además, teniendo en cuenta la bibliografía recopilada se encontró que este tipo de biodigestores son cargados una sola vez de forma total y la descarga se efectúa una vez que se ha

dejado de producir el biogás, representando una alternativa bastante viable para cuantificar y evaluar el rendimiento teórico del gas y metano teniendo en cuenta la escala planteada.

Se propuso un volumen total del recipiente para el primer reactor de 5 L con 19.2 cm de diámetro y 17.3 cm de altura. Sin embargo, el volumen de reacción efectivo o neto de este reactor será de 3.6 L y el volumen dispuesto para liberación de gases será de 1.4 L con el fin de permitir el libre flujo de gas dentro del biodigestor y evitar posibles sobrepresiones. Para el segundo reactor se planteó un volumen total del recipiente 8 L con 19.8 cm de diámetro y 26.5 cm de altura, no obstante, el volumen neto o de reacción efectivo de este biorreactor es de 5.76 L y el volumen para liberación de gases será de 2.24 L.

Se planteó un sistema a escala laboratorio para procesar un total de 8.6 kg de residuos orgánicos actuando como sustrato, junto con 4.3 kg de excretas bovinas como cosustrato. Efectuado todo el proceso de digestión anaerobia y a partir del método volumétrico para la determinación de metano en el biogás, se determinó el rendimiento del proceso mediante la ecuación de Buswell para cuantificar numéricamente la producción teórica de biogás, metano y dióxido de carbono, dando como resultado un rendimiento teórico biogás (RTB) de 7.48 m³/g, un rendimiento teórico de metano (RTM) de 0.52 m³/kg y un rendimiento teórico de dióxido de carbono (RTD) de 0.35 m³/kg.

RECOMENDACIONES

Se debe tener en cuenta que el proyecto está diseñado a escala laboratorio por medio de una revisión bibliográfica. Se evaluó únicamente los sólidos totales, porcentaje de nitrógeno, lignina, hemicelulosa y celulosa de manera experimental por medio de un laboratorio especializado para un mix de residuos de naranja, mandarina y limón. Por ende, se sugiere realizar una evaluación y análisis de factibilidad experimental para así ser desarrollado a escala piloto y/o industrial. De igual manera, comparar con los datos experimentales obtenidos y con los teóricos expuestos en el trabajo para validar el rendimiento del biogás, ya que el modelo de Buswell es ideal.

A su vez, se recomienda hacer una validación experimental de la propuesta de diseño del sistema de secuenciación anaeróbico en dos etapas, es decir, realizar el montaje con las configuraciones, condiciones y parámetros expuestos a lo largo de todo el trabajo de grado, ya que esta propuesta únicamente se validó y analizó de manera teórica y bajo circunstancias ideales, teniendo en cuenta que para la construcción del diseño se tomó como referencia varios artículos en donde si se efectuó el desarrollo experimental, más sin embargo este no se constató en el laboratorio para evaluar su viabilidad ni su cercanía con la fundamentación teórica.

Por otro lado, la implementación del diseño propuesto está ligado a la disposición de los residuos, por lo que se aconseja la realización de este dentro de la zona geográfica de la empresa y/o cultivo. Las distancias cortas favorecen en términos financieros, transporte, distribución y recolección de los residuos. Cabe resaltar que las empresas de cultivo y/o procesamiento de frutas mencionadas en la sección “2. Selección y caracterización de los residuos de fruta cítrica” en el ítem “2.2. Desarrollo”, solo se tuvo contacto a partir de sus redes sociales y artículos de estudio, por lo que sería importante tener un contacto directo para garantizar la credibilidad de las cantidades de residuos generados y tener una mayor precisión en el desarrollo experimental.

De igual manera, se aconseja realizar un control constante a las variables y condiciones que influyen en el funcionamiento del proceso y crecimiento de los microorganismos, tales como pH, temperatura, ácidos grasos volátiles, así asegurar un correcto desarrollo y evitar la generación de inhibidores. Si la medición de estos parámetros se decide realizar in situ, se recomienda efectuar un control periódico en un intervalo de tiempo más amplio cuando se tenga la estabilización del medio para cuantificar el biogás producido sin retirar muestras del reactor. Cabe mencionar, que

los reactores del proceso son totalmente herméticos para garantizar una baja presencia de oxígeno, por lo cual, las muestras de análisis deben ser recolectadas por medio de tuberías y si se requiere efectuar muestreos se haría por medio de bypass para impedir el ingreso de O₂ al sistema.

A su vez, con respecto a las condiciones de operación, se recomienda ampliar los pretratamientos mecánicos de la materia prima más allá de la disminución del tamaño de partícula por molienda y tamizado, los pretratamientos químicos para extraer el aporte nutricional de las excretas en la codigestión, en donde se analice de manera experimental el grado de remoción y la solubilización efectiva del medio ácido en el sistema de extracción y su incidencia en la producción de biogás, y finalmente, constatar en el laboratorio el pretratamiento alcalino tras la adición de sustancias alcalinizantes (bicarbonato de sodio) con el fin de evaluar su incidencia en la estabilización del pH en la mezcla debido a la degradación de la materia orgánica.

Se recomienda evaluar de manera experimental la aplicación de un método riguroso para la cuantificación del rendimiento de metano, como lo es la cromatografía de gases o mediante la cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC), las cuales permitirán obtener resultados más específicos y robustos entorno al contenido de metano y los demás compuestos que están inmersos en el biogás producido.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] FAO, “Alimentación: pasando de pérdidas a soluciones,” 12 Octubre 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/colombia/noticias/detail-events/en/c/1238132/>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [2] M. T. Varnero, “Manual del biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Santiago de Chile, Chile.,” 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf> . [Último acceso: 28 Marzo 2022].
- [3] CONPES, “Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos .,” 21 Noviembre 2016. [En línea]. Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [4] MINAGRICULTURA, “Cadena del cítrico. Indicadores e instrumentos. Indicadores de cadenas agrícolas y forestales,” Junio 2019. [En línea]. Disponible en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/2019-06-0%20Cifras%20Sectoriales.pdf> [Último acceso: 23 Marzo 2022].
- [5] Reyes, E., “Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos” Octubre-diciembre, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://lamjol.info/index.php/FAREM/article/view/5552/5248> [Último acceso: 19 Febrero 2022].
- [6] M. Cordovés-Herrera, T. Sáenz-Coopat y A. Cabello-Balbín, “La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. La Habana, Cuba.,” Noviembre 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf> [Último acceso: 22 Febrero 2022].

[7] Srisowmeya G., Chakravarthy M., Nandhini G. “Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review”, noviembre 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109587> [Último acceso: 10 Marzo 2022].

[8] Meegoda, J., Li, B., Patel, K., Wang, L. “Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion,”. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224> [Último acceso: 31 Febrero 2022].

[9] R. A. Parra Huertas, “Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria.,” Agosto 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014. [Último acceso: 24 Marzo 2022].

[10]. Parra, R. “Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria” 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014 [Último acceso: 12 Julio 2022].

[11] IDEAM, “Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Sólidos totales secados. SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA - GRUPO LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL.,” 14 Junio 2007. [En línea]. 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>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].

[12] C. Sospedra Lletí, “Estudios de optimización y diseño del proceso de digestión anaerobia para la Edar de Alcoi. Universidad Politécnica de Valencia.,” Julio 2017. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/97972/Sospedra%20-%20Estudios%20de%20optimizacion%20y%20dise%C3%B1o%20del%20proceso%20de%20digestion%20anaerobia.pdf?sequence=3>. [Último acceso: 6 Marzo 2022].

[13] J. Sáez Rico, “Diseño de un reactor anaerobio para la digestión de fangos. Universidad Politécnica de Valencia.” Septiembre 2017. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/100168/%20S%C3%81EZ%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20un%20reactor%20anaerobio%20para%20la%20digesti%C3%B3n%20de%20fangos.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 11 Marzo 2022].

[14] M. D. Grau Vilalta, “Estudio del comportamiento de reactores discontinuos y semicontinuos: modelización y comprobación experimental. Universidad Politécnica de Cataluña.” Septiembre 1999. [En línea]. Disponible en: https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6463/02_grauVilalta_capitol_1.pdf. [Último acceso: 11 Marzo 2022].

[15] S. Ibáñez Vega, “Sistemas de control “on line” de reactores químicos Batch. Departamento de ingeniería electrónica.” 2019. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/185196/Memoria.pdf?sequence=7&isAllowed=y>. [Último acceso: 11 Marzo 2022].

[16] R. Solera, L. I. Romero y D. Sales, “The Evolution of Biomass in a Two-phase Anaerobic Treatment Process. Puerto Real, Cádiz.” 11 Diciembre 2001. [En línea]. Disponible en: http://pierre.fkit.hr/hdki/cabeq/pdf/16_1_2002/Solera.pdf. [Último acceso: 18 Abril 2021].

[17] L. M. Cárdenas-Cleves, B. A. Parra-Orobio, P. Torres-Lozada y C. H. Vásquez-Franco, “Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. Cali, Colombia.” 5 Enero 2016. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008> [Último acceso: 2 Marzo 2021].

[18]. Frutolima. “Productos”. 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.frutolima.com/contacto> [Último acceso: 13 Marzo 2021].

[19] Escarraga, K., Espinosa, N. “Evaluación de la obtención de biogás mediante la digestión anaerobia de los residuos de fruta generados por una empresa de alimentos a escala laboratorio”

2019. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8176> [Último acceso: 05 Abril 2022]

[20] De La Torre, N. “Digestión anaerobia en comunidades rurales” 2008. [En línea]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11627/PFC_Nadia_deLaTorre_Caritas.pdf?sequence=1#:~:text=La%20biomasa%20utilizada%20para%20la,con%20agua%20lo%20denominaremos%20purines [Último acceso: 05 Abril 2022]

[21] BESEL S.A, “Biomasa: Digestores anaerobios. IDEA: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España.,” Octubre 2007. [En línea]. Disponible en: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_digestores_anaerobios_a2007_0d62926d.pdf. [Último acceso: 16 Marzo 2022].

[22] Criollo S., Rodríguez E. “Diseño teórico de una planta de producción de biogás a partir de residuos de naranja en la ciudad de Bogotá” 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8842/1/210140-2022-1-IQ.pdf>. [Último acceso: 8 Junio 2022]

[23] Sánchez, C., Patiño, M., Alcántara, J., Reyes, Y., Pérez, M., Ortiz, E. “Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares” 2016. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.05>. [Último acceso: 26 Mayo 2022]

[24] Parra, B., Torres, P., Marmolejo, L., Cardenas, L., Vasquez, F., Torres, W., Ordoñez, J. “Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal” 2015. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.004>. [Último acceso: 26 Mayo 2022]

[25] Bavera, G., Peñafort, C. “Lectura de la bosta del bovino y su relación con la alimentación” 2006 [En línea]. Disponible en: <https://www.produccion->

animal.com.ar/informacion_tecnica/manejo_del_alimento/61-heces_del_bovino_y_relacion_con_la_alimentacion.pdf. [Último acceso: 15 Julio 2022]

[26] Martínez, L. “El estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente” [En línea]. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1994_01.pdf [Último acceso: 15 Julio 2022]

[27] Nila, J., “Influencia de los compuestos lignocelulósicos en el estado de degradación de los residuos sólidos confinados en el relleno clausurado de Morelia, Michoacán” [En línea]. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/bitstream/20.500.12930/3018/1/MXL111473.pdf> [Último acceso: 24 Marzo 2022]

[28] Cortes, W. “Tratamientos Aplicables a Materiales Lignocelulósicos para la Obtención de Etanol y Productos Químicos” 2014. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.18270/rt.v13i1.1297> [Último acceso: 26 Marzo 2022]

[29] Durán, D. “Aprovechamiento energético de la codigestión anaeróbica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y residuos de cosecha de plátano para la producción de biogás” 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/79232/1118556228.2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Último acceso: 26 Marzo 2022]

[30] Márquez, F., “Optimización del procesamiento de las cáscaras de mandarina, naranja, limón y toronja; para la obtención de la d-glucosa y el ácido galacturónico y una potencial aplicación industrial”, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/16312/PG-2004-Marquez%20Mamani%2c%20F%c3%a9lix%20Obispo.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Último acceso: 27 Marzo 2022]

- [31] Cajigas, A., “Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaeróbico de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca” 2004. [En línea]. Disponible en: <file:///F:/Downloads/Dialnet-IMPORTANCIADDELPHYLAALCALINIDADENELTRATAMIENTOANAER-4838510.pdf> [Último acceso: 5 Abril 2022].
- [32] Milquez H. “Digestión anaerobia en dos fases de los residuos de cebolla blanca (*Allium cepa*) y desarrollo de un modelo lineal adaptativo predictivo” Centro de Investigación Científica de Yucatán, AC. 2017. [En línea]. Disponible en: https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/458/1/PCER_D_Tesis_2017_Milquez_Harvey.pdf. [Último acceso: 11 Julio 2022]
- [33] Ganesh, R., Torrijos, M., Sousbie, P., Lugardon, A., Steyer, J., Delgenes, J. “Single-phase and two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: Comparison of start-up, reactor stability and process performance” 2014. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.023> [Último acceso: 20 Abril 2022]
- [34] Sosnowski, P., Wieczorek, A., Ledakowicz, S. “Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes”. 2003. [En línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00049-7) [Último acceso: 20 Abril 2022]
- [35] Kaijun, K., Wang, J., Yuan, Q., Shi, C., Wu, J., Zuo, J. “Performance assessment and metagenomic analysis of full-scale innovative two-stage anaerobic digestion biogas plant for food wastes treatment” 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121646> 0959-6526 [Último acceso: 20 Abril 2022]
- [36] Zuo, Z., Wu, S., Zhang, W., Dong, R. “Performance of two-stage vegetable waste anaerobic digestion depending on varying recirculation rates” 2014. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.156> [Último acceso: 21 Abril 2022]

[37] Wu, Y., Wang, C., Liu, X., Ma, H., Wu, J., Zuo, J., Wang, K. “A new method of two-phase anaerobic digestion for fruit and vegetable waste treatment” 2016. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.050> [Último acceso: 22 Abril 2022]

[38] Castro, A. “Estudio bibliografico del estado del arte de la digestion anaerobia de residuos solidos organicos y mejora del proceso mediante pretratamiento” 2018. [En línea]. Disponible en: <https://rodin.uca.es/bitstream/handle/10498/20924/TFG-Antonio%20Jes%c3%bas%20Castro%20Granado.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Último acceso: 22 Abril 2022]

[39]. Martínez C., García Y. “Utilización de pre-tratamientos básicos y específicos para la producción de biogás. Revisión y análisis” 2016. [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542016000300009. [Último acceso: 10 Julio 2022]

[40] Rivas, O., Faith, M., Guillén, R. “Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad” 2009. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4835857> [Último acceso: 26 Abril 2022]

[41] Castro, L., Guzman, C., Escalante, H. “Influence of particle size and temperature on methane production from fique’s bagasse” 2012. [En línea]. Disponible en: <http://revistas.ustabuca.edu.co/index.php/ITECKNE/article/view/84> [Último acceso: 25 Abril 2022]

[42] Lombana L., Saavedra A., Correa F. “Variables influyentes en el proceso de lixiviación para la recuperación de metales contenidos en lodos galvánicos” 11 de septiembre de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7739/1/6122928-2018-1-IQ.pdf>. [Último acceso: 12 Julio 2022]

[43] Cajigas, A., Perez, A., Torres, P. “Importancia del ph y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca” 2005. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84911698045> [Último acceso: 25 Abril 2022]

[44] Peñaranda, L., Montenegro, S., Giraldo, P. “Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. Revista de investigación agraria y ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia,” 5 Junio 2017. [En línea]. Disponible en: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2040>. [Último acceso: 17 Mayo 2022].

[45]. Cruz Y., López M. “Evaluación de alcalinizantes en el proceso de ajuste de pH para el agua tratada en el río Cauca” 2015. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/9019/3754-0505715.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 7 Julio 2022]

[46] Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos. “Avances del acuerdo 344 de 2008 “por el cual se dispone diseña y ejecuta un programa para la gestión de los residuos sólidos orgánicos y se dictan otras disposiciones” 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.uaesp.gov.co/transparencia/informacion-interes/publicacion/informacion-adicional/avances-del-acuerdo-344-2008>. [Último acceso: 27 Mayo 2022].

[47] Grupo Acura. “Tanques de almacenamiento: guía de ventajas, materiales, clasificaciones y recomendaciones” 2021. [En línea]. Disponible en: <https://grupoacura.com/blog/soluciones-y-tecnologia/tanques-de-almacenamiento/#tanques>. [Último acceso: 18 Mayo 2022].

[48] González, J. “Diseño de un biodigestor de dos etapas a escala laboratorio” 2013. [En línea]. Disponible en: <https://zagan.unizar.es/record/10153/files/TAZ-PFC-2013-091.pdf> [Último acceso: 30 Mayo 2022]

[49] Equipos y Laboraotrio de Colombia “Agitador de hélice” 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/agitador-de-hElice>. [Último acceso: 1 Junio 2022]

[50] DLC S.A “Agitador de hélice” 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.dlc.cl/wp-content/themes/dlc/archivos/mezcladores.pdf>. [Último acceso: 3 Junio 2022]

[51] Briend “Válvula esférica 3 vías tipo T” 2021. [En línea]. Disponible en: <https://briendsrl.com/productos/valvula-esferica-3-vias-tipo-t/>. [Último acceso: 2 Junio 2022]

[52] Fluideco “¿Que es una bomba peristáltica” 2019. [En línea]. Disponible en: <https://fluideco.com/que-es-una-bomba-peristaltica/>. [Último acceso: 3 Junio 2022]

[53] Fisher Scientific “Watson-Marlow Peristaltic Pump” 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.fishersci.es/shop/products/peristaltic-pump-6/12466260>. [Último acceso: 2 Junio 2022]

[54] Guerrero, S. “Catalogación de válvulas manuales, tubería y accesorios en una planta papelera” 2010. [En línea]. Disponible en: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/1328/TME00463.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Último acceso: 28 Mayo 2022].

[55] Tapia, V. “Instalacion y uso de biogas”. 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/93-Manual-de-Biodigestores-Final.pdf> [Último acceso: 28 Mayo 2022].

[56] Baquerizo, R., Pagés, J., Pereda, I. “El modelo de Buswell. Aplicación y comparación. Principales factores que influyen en su aplicación” 2016 [En línea]. Disponible en: <https://www.virtualpro.co/files-bv/20160101/20160101-019.pdf> [Último acceso: 28 Mayo 2022].

[57] PanReac AppliChem. “Sodio Hidroxido 1N solucion valorada” 2022. [En línea]. Disponible en: <https://itwreagents.com/united-states/es/product/sodio-hidroxido-1-moll-1n-solucion-valorada/181691> [Último acceso: 31 Mayo 2022].

ANEXOS

ANEXO 1
RESULTADOS DE LABORATORIO FISICOQUÍMICO PARA EL MIX DE RESIDUOS
DE CASCARA DE NARANJA, MANDARINA Y LIMÓN.



Código: P-03-02
 Versión: 4
 Fecha: 02/03/2022

RESULTADOS DE ANÁLISIS

INFORME DE RESULTADOS Nº: E3990					
INFORMACIÓN DEL CLIENTE		INFORMACIÓN DE LA MUESTRA		INFORMACIÓN DE RECEPCIÓN	
CLIENTE:	NICOLAS RUIZ PADELLA	LUGAR DE RECOGIDA: (*)	N.E	I.D. MUESTRA:	22-4787
NT:	1032508893	FECHA FABRICACIÓN (*)	N.E	ODS:	22-3026
TELÉFONO:	3057906102	FECHA VENDIMIENTO (*)	N.E	FECHA DE MUESTREO: (*)	01/04/2022
CONTACTO:	NICOLAS RUIZ PADELLA	LOTE (*)	N.E	FECHA DE RECEPCIÓN:	01/04/2022
DIRECCIÓN:		ESTADO: (*)	PROCESADO	MUESTRA T (*) C: (*)	20
CIUDAD:	BOGOTÁ	TIPO DE EMPAQUE: (*)	BOLSA ZIPLOCK	RESPONSABLE MUESTREO:	CLIENTE
COTIZACIÓN Nº:	22-1597	TIPO DE MUESTRA: (*)	RESIDUOS ORGÁNICOS	RECEPCIÓN T (*) C:	22,2
ALMACENAMIENTO		PRODUCTO: (*)	MIX DE RESIDUOS	CANTIDAD (g/ml):	500g
CONTRAMUESTRA:	Análisis FQ: 15 días Análisis MB: 15 días	RESPONSABLE PROCESO	N.E	OBSERVACIONES: (*)	MUESTRA TOMADA POR EL CLIENTE
		CURANTE: (*)	N.E		

Físicoquímica

FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	INCERTIDUMBRE	LÍMITE CUANTIFICACIÓN	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	NO SE COMPARA CONTRA NINGUNA NORMA	CONFORMIDAD
12/04/2022	Fibra Ácida (Lignina)	2,05	%	0,154	0,500	Sulfuric Acid Lignin	ADAC 973.18	N.E	NO APLICA
12/04/2022	Fibra Detergente Neutro (Hemicelulosa, Celulosa y Lignina) / Neutral Detergent Fiber	36,1	%	2,85	0,500	Reflejo Cerrado	ADAC 2002.04	N.E	NO APLICA
12/04/2022	Fibra en Detergente ácido (Celulosa y Lignina) / Detergent Fiber	22,9	%	1,67	0,500	Gravimetría	ADAC 973.18	N.E	NO APLICA
22/04/2022	Sólidos Totales	26,9	g/300g	1,15	-	Secado a 100°C-Gravimétrico	ADAC 925.23	N.E	NO APLICA
12/04/2022	Nitrógeno Total	0,750	g/300g	NO APLICA	-	Método Kjeldhal	ADAC 2001.11	N.E	NO APLICA

* Análisis subcontratados
 Formato fecha: dd/mm/yyyy
 N.E.: No Específica N.A.: No Aplica

Biopolímeros Industriales S.A.S.
 Carrera 18 No. 63a - 50 Piso 6, Bogotá-Colombia
 Telefonos: (+1) 5405700/5406606, Bogotá
www.biopolab.com

INFORME DE RESULTADOS Nº:	83990
<p>Estos resultados son válidos únicamente para esta muestra recibida y analizada en el Laboratorio Biopolab SAS. Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada. Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónica, o al correo e inmediatamente será atendida. La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.</p>	
<p>DESCARGO DE RESPONSABILIDAD: (*) BIOPOLAB no se hace responsable por la información suministrada por el cliente asociada a la toma de muestras y a otros datos descriptivos de la misma ni de las condiciones al momento de la toma. Los resultados emitidos corresponden a las muestras como se recibieron en el laboratorio.</p>	
<p>INCERTIDUMBRE Los resultados de los análisis presentan una incertidumbre que ha sido estimada a través de la confirmación del método (aplica para valores cuantitativos), la incertidumbre declarada corresponde específicamente al resultado del parámetro evaluado y está expresado en las mismas unidades del resultado. La incertidumbre ha sido reportada con un Factor de Cobertura $k=2$, para un nivel de confianza aproximado del 95%.</p>	
<p>REGLA DE DECISIÓN La regla de decisión aplicada* para establecer la conformidad de un resultado en referencia con un requisito normativo, se basa en la guía ILAC-GK01/2021, teniendo como punto base el numeral 4.1 Declaración binaria de aceptación simple, donde la probabilidad de estar por fuera del límite de tolerancia es del 50% cuando la medición se encuentre exactamente en el límite de la especificación. En el caso en que la regla de decisión no se ajuste a las necesidades o requerimientos del cliente, se establecerá una regla de decisión diferente de mutuo acuerdo. * Válido para técnicas cuantitativas.</p>	

Documento aprobado por:


Xavier Alfonso Galindo Velazquez
 Gerente Técnico
 P. Quindío, Matrícula Profesional PQ - 07775
R/DN DEL INFORME

Fecha de expedición: 22/04/2022

Elaborado por: Xavier Alfonso Galindo Velazquez

ANEXO 2
ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LOS BIODIGESTORES.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS											
Referencia	7003	7004	7006	7010	7011	7015	7020	7026	7042	7055	7068
Capacidad (L)	3,6	3,6	6	10	10	15	20	26	42	55	68
Diám. recipiente (mm)	198	198	198	274	274	274	274	316	410	410	410
Diám. boca (mm)	136	136	136	204	204	204	204	204	282	282	282
Altura (mm)	173	173	265	239	239	328	418	426	416	518	632
Material	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE
Color estándar del recipiente	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco
Color estándar de la tapa	rojo	rojo	rojo	rojo	rojo	rojo	rojo	rojo	rojo	rojo	rojo
Disponible versión antiestática	no	no	no	no	no	no	no	si	no	no	no
Disponible con asas	no	no	no	no	no	no	no	no	si	si	si
Área de impresión alto (mm)	10	40	70	20	60	80	150	130	40	120	200
Área para la etiqueta ancho (mm)	150	230	300	300	300	300	300	330	330	330	330
Homologación UN											
Tipo de contenido	Materiales sólidos y viscosos										
Grupo del envase	I, II, III	I, II, III	I, II, III	I, II, III	I, II, III	I, II, III	I, II, III	I, II, III	I, II, III	I, II, III	I, II, III
Peso máximo (kg)	12	12	20	22	22	22	27	33	51	66	81
Unidad de embalaje											
Palet 1000x1200 mm	360	360	240	128	128	96	80	55	40	32	24

Aclaración: Los biodigestores propuestos son las referencias 7004 y 7006

Nota. La figura se presenta como la ficha técnica de referencia utilizada para los biodigestores. Imagen extraída de: Sunbox “Catálogos online” 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.sunbox-online.com/>. [Último acceso: 31 Mayo 2022]

ANEXO 3

DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO TEORICO DE BIOGAS.

Los coeficientes a, b, c y d corresponden al carbono, nitrógeno, hidrogeno y oxígeno, respectivamente, los cuales se pueden determinar a partir de la ecuación 5. Para ello, es importante el porcentaje en peso de los coeficientes de cada residuo, los cuales se exponen en la tabla 32.

Tabla 32.

Recopilación de los datos teóricos de cada elemento.

Materia prima Elemento	Excretas bovinas	Residuos de naranja	Residuos de mandarina	Residuos de limón
%C	30	20	20	20
%H	3.5	28.5	29.1	29.7
%O	20.19	13	13.5	14
%N	1.3	0.09	0.13	0.21

Nota. En la tabla se recopilan los datos teóricos del porcentaje en peso de los coeficientes para cada residuo. Datos tomados de: M. T. Varnero, “Manual del biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Santiago de Chile, Chile.” 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf> . [Último acceso: 28 Marzo 2022].

De acuerdo a la ecuación 7, se determinar la masa de la mezcla, teniendo en cuenta el de cada residuo.

Ecuación 8.

Determinación de la masa del elemento

$$Masa_x = Masa_{sustancia} * Composición_x$$

Residuo de naranja:

$$Masa_{Carbono} = 0.61kg * 20\% = 0.122kg$$

$$Masa_{Hidrogeno} = 0.61kg * 28.5\% = 0.174 kg$$

$$Masa_{Oxigeno} = 0.61kg * 13\% = 0.08 kg$$

$$Masa_{Nitrogeno} = 0.61kg * 0.09\% = 5.49 \times 10^{-4} kg$$

Residuo de mandarina:

$$Masa_{Carbono} = 0.68kg * 20\% = 0.136 kg$$

$$Masa_{Hidrogeno} = 0.68 kg * 29.1\% = 0.197 kg$$

$$Masa_{Oxigeno} = 0.68 kg * 13.5\% = 0.092 kg$$

$$Masa_{Nitrogeno} = 0.68 kg * 0.13\% = 8.84 * 10^{-4} kg$$

Residuo de limón:

$$Masa_{Carbono} = 0.86 kg * 20\% = 0.172 kg$$

$$Masa_{Hidrogeno} = 0.86 kg * 29.7\% = 0.255 kg$$

$$Masa_{Oxigeno} = 0.86 kg * 14\% = 0.12 kg$$

$$Masa_{Nitrogeno} = 0.86 kg * 0.21\% = 1.806 * 10^{-3} kg$$

Residuo de excretas bovinas:

$$Masa_{Carbono} = 4.3 kg * 30\% = 1.29 kg$$

$$Masa_{Hidrogeno} = 4.3 kg * 3.5\% = 0.15 kg$$

$$Masa_{Oxigeno} = 4.3 kg * 20.19\% = 0.86 kg$$

$$Masa_{Nitrogeno} = 4.3 kg * 1.3\% = 0.056 kg$$

Una vez determinada la masa de cada elemento, se determina la masa en total de la mezcla, mediante la suma de cada coeficiente.

$$Masa_{mezcla-carbono} = 0.122kg + 0.136kg + 0.172kg + 1.29kg = 1.72kg$$

$$Masa_{mezcla-Hidrogeno} = 0.174kg + 0.197kg + 0.255kg + 0.15kg = 0.776kg$$

$$Masa_{mezcla-Oxigeno} = 0.08kg + 0.092kg + 0.12kg + 0.86kg = 1.152kg$$

$$Masa_{mezcla-nitrogeno} = 5.49 * 10^{-4}kg + 8.84 * 10^{-4}kg + 1.806 * 10^{-3}kg + 0.056kg = 0.06kg$$

Finalmente, el peso molecular de los elementos se evidencia en la tabla 33, los cuales se utilizaron en la ecuación 5 para lograr determinar el valor de cada coeficiente.

Tabla 33.

Peso de cada elemento

Elemento	Peso molecular (kg)
C	12
N	14
H	1
O	16

Nota. En la tabla se evidencia el peso molecular para cada elemento.

Una vez establecido los datos necesarios para desarrollar adecuadamente de la ecuación 5, se puede señalar los valores de los coeficientes:

$$Coeficiente a = \frac{1.72kg}{12 kg * 2} = 0.072$$

$$Coeficiente b = \frac{0.776kg}{1kg * 2} = 0.388$$

$$Coeficiente c = \frac{1.152kg}{16kg * 2} = 0.036$$

$$\text{Coeficiente } d = \frac{0.056 \text{ kg}}{14 \text{ kg} * 2} = 2 \times 10^{-3}$$

Debido a que se desarrolló de forma estequiométrica, se divide el valor del coeficiente a entre los otros coeficientes. Cabe resaltar que no afecta la relación que existe entre cada uno.

$$\text{Coeficiente } a = 1$$

$$\text{Coeficiente } b = 5.4$$

$$\text{Coeficiente } c = 0.5$$

$$\text{Coeficiente } d = 0.03$$

Según lo expuesto en el capítulo 4, sección 4.2.7. Recolección del gas, mediante la ecuación 6, se reemplaza los datos para lograr determinar el rendimiento teórico de biogás.

$$RTB = \frac{22.415 * 1}{(12 * 1 + 5.4 + 16 * 0.5 + 14 * 0.03)}$$

$$RTB = 0.87 \frac{m^3}{kg}$$