

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS
VEGETALES OBTENIDOS EN LA CENTRAL DE ABASTOS DE BOGOTÁ
MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

ANGIE MARIANA GARCÍA RODRIGUEZ

JUAN DANIEL GÓMEZ FRANCO

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2016**

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE
RESIDUOS VEGETALES OBTENIDOS EN LA CENTRAL DE ABASTOS
DE BOGOTÁ MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

ANGIE MARIANA GARCÍA RODRIGUEZ

JUAN DANIEL GÓMEZ FRANCO

**Proyecto de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO.**

Director

ANDREA LACHE MUÑOZ

Ingeniera Química.

M.Sc. Ingeniería Química.

Codirector

ADRIANA INÉS PÁEZ MORALES

Microbióloga.

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C

2016

Nota de aceptación

Firma Director

Firma Coordinador

Firma Calificador

Bogotá, D.C. Noviembre 04 De 2016

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados.

Ing. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García Peña

Decano Facultad de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

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

DEDICATORIA

Agradezco primero a Dios por permitirme culminar este proyecto, a mi familia por apoyarme en cada momento e incentivarme a ser mejor profesional y mejor persona, dedico este título a mis padres que me dieron la vida, educación, y todos sus consejos. Mi mamá por su ejemplo de superación, fortaleza y dedicación, a mi papá por el apoyo, consejos y motivación a lo largo de mi carrera y de mi vida, a mis hermanos Santiago, Esteban y Juliana, por su respaldo y admiración, a mi abuelito Miguel y mi abuelita Ana por sus valores, por su ejemplo y su amor, porque cada uno de ellos es el motor de mi vida y el amor más puro que se pueda tener. A todas y cada una de las personas que han hecho parte de este proceso y que me acompañaron en cada paso, a todos aquellos que han visto mi esfuerzo para culminar de la mejor manera este objetivo para lograr uno de las metas más importantes en mi vida, a mis amigos, compañeros y colegas, con los que he compartido historias, alegrías y tristezas. Definitivamente no podría haber pedido mejores personas, mejor respaldo y amistad en mi vida.

Angie Mariana García Rodríguez

DEDICATORIA

Quiero dedicar este gran logro en mi vida a mis padres y mi hermana que son mi motor de vida, en el que día a día me enseñan hacer una persona íntegra. También agradezco a mis compañeros que compartieron alegrías y tristezas durante este tiempo, y por ultimo quiero agradecer a dios, quien me ha permitido tener este logro en mi vida.

Juan Daniel Gómez Franco.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Al Sr. Elmer Restrepo, gerente de la empresa Unión Temporal Residuos Verdes, por toda la colaboración y ayuda.

A los Ingenieros Leobell Hernández y Mateo Cardona por su y contribución, apoyo y ayuda brindada. A nuestras familias por su apoyo constante para alcanzar nuestros objetivos y metas propuestas, y a todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron en la realización y culminación de este proyecto.

A la Ingeniera. Andrea Iache y la Microbióloga Adriana Páez, por su cooperación y asistencia en el desarrollo de esta labor.

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	20
1. MARCO TEÓRICO	22
1.1 TIPOS DE RESIDUOS PRESENTES EN CORABASTOS BOGOTÁ	22
1.1.1 Clasificación de los residuos	23
1.1.2 Características de los residuos vegetales	24
1.1.3 Estadísticas.	24
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE BIODIGESTIÓN	26
1.2.1 Etapas del proceso	27
1.2.1.1 Hidrolisis	27
1.2.1.2 Ácido génesis	27
1.2.1.3 Acetogénesis	28
1.2.1.4 Metanogénesis	28
1.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	28
1.3.1 Tipo de sustrato	28
1.3.2 Velocidad de carga orgánica y Tiempo de retención.	29
1.3.3 Temperatura	29
1.3.4 pH	30
1.3.5 Humedad.	31
1.3.6 Macronutrientes y Micronutrientes	31
1.3.7 Relación C/N	33
1.3.8 Inhibición y Toxicidad	34
1.4 MICOORGANISMOS PRESENTES EN LA DIGESTION ANAEROBIA	34
1.4.1 Recuento Bacteriano	34
1.4.2 Bacterias Hidrolíticas	34
1.4.3 Bacterias Acidogénicas	35
1.4.4 Bacterias Metanogénicas	35
1.5 TIPOS DE BIODIGESTORES	36
1.5.1 Ventajas de los biodigestores	36
1.5.2 Desventajas de los biodigestores	37

1.5.3 Eficiencia	37
1.6 CLASES DE BIODIGESTORES	37
1.6.1 Reactores sin retención interior	38
1.6.2 Reactores con retención de	40
1.6.3 Sistema mono etapa.	41
1.6.4 Sistema multietapa	42
1.7 BIOGÁS	43
2. METODOLOGIA	44
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS VEGETALES	44
2.1.1 Evaluación de la estabilidad física a lo largo del año de los residuos	45
2.1.2 Composición de macronutrientes y micronutrientes.	47
2.1.2.1 Matriz de selección	48
2.1.3 Evaluación de la composición fisicoquímica	49
2.1.3.1 Humedad	49
2.1.3.2 pH y Temperatura	49
2.2 DIAGNOSTICO DE EQUIPOS	50
2.3 FORMULACIÓN DE SUSTRATOS	54
2.4 DETERMINACIÓN DE LA POBLACIÓN MICROBIANA EN LA FASE HIDROLÍTICA	55
2.4.1 Evaluación microbiológica	55
2.4.2 Actividad enzimática.	56
2.5 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	57
2.5.1 Comportamiento del pH	58
2.5.2 Comportamiento de la temperatura.	58
2.5.3 Determinación de parámetros fisicoquímicos a la salida del proceso	58
2.5.3.1 Sólidos totales y volátiles	58
2.5.3.2 Demanda Química de Oxígeno	59
2.5.4 Cromatografía de gases.	60
3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	62
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS VEGETALES	62
3.1.1 Matriz de selección	62
3.2 MONTAJE DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	63

3.3 FORMULACIÓN DE LAS MEZCLAS	67
3.4 EVALUACIÓN MICROBIOLÓGICA DE LA POBLACIÓN MICROBIANA DENTRO DEL DIGESTORES (ETAPA HIDROLÍTICA)	71
3.5 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	74
3.5.1 Comportamiento del pH.	75
3.5.2 Comportamiento de la temperatura	76
3.5.2.1 Análisis de transferencia de calor.	78
3.5.3 Determinación de parámetros a la salida del proceso	80
3.5.3.1 Sólidos totales y volátiles	81
3.5.3.2 DQO.	82
3.5.4 Cromatografía de gases.	82
3.5.4.1 Balance de masa y energía.	83
3.5.4.2 Balance de energía del proceso.	87
3.5.5 Diseño de Experimentos	95
4. CONCLUSIONES	95
5. RECOMENDACIONES	97
BIBLIOGRAFÍA	98
ANEXOS	103

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Composición química del biogás	22
Tabla 2. Residuos generados en Corabastos en el año 2015	23
Tabla 3. Energía equivalente (Valor energético) Biogás Vs otras fuentes	43
Tabla 4. Composición nutricional verduras seleccionados	47
Tabla 5. Composición nutricional frutas seleccionados	48
Tabla 6. Características del tanque externo Prototipo piloto	51
Tabla 7. Características del tanque interno (cámara del digestor) Prototipo piloto	52
Tabla 8. Características técnicas de la bomba centrífuga.	53
Tabla 9. Relación C/N de residuos animales	54
Tabla 10. Matriz de selección de sustratos residuos verduras	62
Tabla 11. Matriz de selección de sustratos residuos frutas	63
Tabla 12. Promedio de control de temperatura ambiental	66
Tabla 13. Cantidad de residuos en kg	67
Tabla 14. Proporciones de la mezcla de verduras en relación contenido residuos con estiércol y agua	68
Tabla 15. Proporciones de la mezcla de frutas en relación contenido residuos con estiércol y agua	68
Tabla 16. Resultados de análisis de sólidos totales para cada mezcla.	81
Tabla 17. Resultados DQO para cada mezcla.	82
Tabla 18. Resultados cromatografía de gases	83
Tabla 19. Flujo Másico, mezcla residuos de verduras.	89
Tabla 20. Flujo Másico, mezcla residuos de frutas	89
Tabla 21. Propiedades de alimentos comunes.	90
Tabla 22. Diagrama de bloques.	91
Tabla 23. Resultados Sumas de Cuadrados.	92
Tabla 24. Tabla Anova.	92
Tabla 25. Resultados Anova.	93
Tabla 26. Cambios de pH durante el tiempo de retención	104
Tabla 27. Control de temperatura diaria para las tres mezclas durante el tiempo de retención.	106
Tabla 28. Datos recolectados en los análisis de sólidos totales	115
Tabla 29. Datos recolectados en los análisis de sólidos volátiles	115
Tabla 30. Curva de calibración DQO	117

LISTA DE GRAFICAS

	pág
Grafica 1. Recolección de residuos 2015 en Corabastos	25
Grafica 2. Sumatoria de Recolección de residuos en los últimos 6 años en Corabastos	26
Grafica 3. Comparación control de temperatura exterior, interior y dentro del digestor	66
Grafica 4. pH vs Tiempo de retención.	75
Grafica 5. Temperatura Vs Tiempo de retención	77
Grafica 6. mg O ₂ /L Vs Absorbancia	117

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Esquema de reactores sin retención interior de biomasa.	38
Figura 2. Esquema de reactores de mezcla completa sin y con recirculación.	38
Figura 3. Esquema de reactores con retención de biomasa	40
Figura 4. Oferta de productos vegetales	46

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág
Ilustración 1. Tanques en fibra de vidrio	51
Ilustración 2. Tanques internos	52
Ilustración 3. Bomba centrífuga	52
Ilustración 4. Agitador monofásico	53
Ilustración 5. Estufa.	59
Ilustración 6. Incineración en Mufla	59
Ilustración 7. Espectrofotómetro.	60
Ilustración 8. Conexión exterior	65
Ilustración 9. Toma de muestreo	65
Ilustración 10. Conexión interna	66
Ilustración 11. Muestreo Mezcla 1	69
Ilustración 12. Muestreo mezcla 2 (Residuos Verduras)	69
Ilustración 13. Muestreo mezcla 3 (Residuos de Frutas)	69
Ilustración 14. Medios de cultivo (Leche)	71
Ilustración 15. Medio de cultivo para celulosa de Mezcla F y V.	72
Ilustración 16. Medio de cultivo para tributirina de las Mezclas F y V.	73
Ilustración 17. Medios de Cultivo para Almidón de la Mezcla F y V	73
Ilustración 18. Medios de cultivo para Lignina de las Mezclas F y V.	74
Ilustración 19. Registro fotográfico para la determinación de solidos totales	114
Ilustración 20. Registro fotográfico para la determinación de solidos volátiles.	114
Ilustración 21. Registro fotográfico para la determinación de DQO.	116

LISTA DE CUADROS

	pág
Cuadro 1. Especificaciones técnicas, Equipos de medición	50
Cuadro 2. Solidos totales	108
Cuadro 3. Solidos volátiles	109
Cuadro 4. DQO	111

LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A. Control de ph	104
Anexo B. Control de temperatura	106
Anexo C. Metodologia analisis fisicoquimico	108
Anexo D. Registros fotograficos y calculos	114
Anexo E. Cromatografia de gases	118
Anexo F. Analisis estadistico	119

GLOSARIO

BIOMASA: es toda la materia orgánica proveniente de árboles, plantas, desechos de animales, residuos provenientes de la agricultura y los residuos urbanos, los cuales pueden ser utilizados para producir energía.

BIODIGESTOR: es un bioreactor herméticamente cerrado, en estos equipos se realiza el proceso de cultivo, sea en estado sólido o líquido y su diseño debe ser tal que asegure homogeneidad entre los componentes del sistema, condiciones óptimas para el crecimiento microbiano y la obtención de metano como producto deseado.

BIOGÁS: como un producto final de proceso de digestión anaerobia, se produce biogás, que es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), Además, también está compuesto por pequeñas cantidades de nitrógeno (N_2) hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y vapor de agua. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso.

DQO (DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO): el DQO es un parámetro que sirve para la estimación de producción de metano.

DIGESTIÓN ANAEROBIA: es un proceso biológico de degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno.

EFLUENTE: el efluente del biodigestor es el líquido que sale al final del proceso, este líquido aun contiene materias orgánicas y nutrientes que después de ser convertidos, pueden ser utilizados como biofertilizantes.

NUTRIENTES: es toda fuente de energía que necesita un organismo para seguir reproduciéndose y funcionando correctamente como carbono, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio.

SUSTRATO: este término se utiliza para referirse a todas las fuentes de carbono y energía.

RESUMEN

La presente investigación surge del interés en el aprovechamiento y caracterización de la biomasa residual principalmente residuos orgánicos, evaluando sus características químicas, fisicoquímicas y microbiológicas para darle una adecuada utilización mediante el proceso de digestión anaerobia. La primera revisión bibliográfica específica se llevó a cabo para determinar la estabilidad de los residuos a lo largo del año en la central de abastos de Bogotá siendo la plaza de mercado más grande de Colombia, y de acuerdo a esto se seleccionaron los residuos que presentaron mayor porcentaje de macro y micronutrientes dentro de los cuales se encuentran tanto vegetales como frutas; para lo cual fueron formuladas tres mezclas; una para vegetales, otra para frutas y la mezcla control con estiércol y agua. Se evaluaron variables como: la temperatura, la humedad, el pH, tiempo de retención, entre otras, que influyen directamente en la producción del biogás. También se realizó un diagnóstico y acondicionamiento de los digestores disponibles a escala piloto en instalaciones de la central de abastos.

El presente proyecto se desarrolló en convenio con la empresa Unión Temporal Residuos Verdes, quien es la encargada de la recolección y disposición final de los residuos que ingresan a Corabastos; para lo cual, la fase experimental se llevó a cabo en el municipio de Sibaté. A partir del proceso de biodigestión se obtuvieron como resultado altos porcentajes de biogás, con un contenido de metano para la mezcla de vegetales de 69,5%, para la mezcla de frutas de 67.7%, y para la mezcla control de 64.1%. Para la selección del mejor sustrato se realizó un análisis estadístico, el cual permitió seleccionar la mezcla que presentaba un menor tiempo de retención, con un mayor porcentaje de metano, siendo esta, la mezcla de vegetales con un tiempo de retención de 50 días para iniciar la fase metanogénica.

Palabras Clave: Digestión Anaerobia, residuos orgánicos, biomasa, microorganismos, caracterización.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la demanda energética mundial es satisfecha principalmente por combustibles fósiles dentro de los cuales está el carbón, el petróleo y el gas natural así como también por energía nuclear, estas fuentes de energía generan contaminación atmosférica en niveles importantes, y en un futuro tienden a desaparecer. Múltiples desarrollos tecnológicos e investigaciones desarrolladas han conducido a una tendencia mundial en la utilización de energías alternativas.

En los últimos años el uso de biomasa ha comenzado a expandirse generando alternativas que contribuyen al medio ambiente con bajos niveles de emisiones contaminantes y utilizando diversas fuentes para su uso, entre las cuales se encuentran los residuos del sector agrícola, los cuales llegan a todas las plazas de mercado del país, siendo Corabastos una de las principales distribuidoras de alimentos en el país, llegan gran cantidad de frutas y verduras provenientes de todo el país. Por esta razón se generan altas tasas de residuos, los cuales según un estudio realizado por el área ambiental de esta central se calcula que el 70% de los residuos son de origen vegetales, 25% se implementa en el proceso de compostaje, y el 5% restante se transporta al relleno de “Doña Juana”, el cual presenta una gran problemática debido a la falta de espacio, imponiendo un requerimiento de aceptación de dichos residuos de máximo el 3% de lo que se genera diariamente¹. Debido a esto se hace necesaria la implementación de procedimientos alternativos para un buen manejo y disposición de estos desechos, uno de ellos es el proceso de fermentación en condiciones anaerobias con microorganismos específicos a partir de condiciones de operación óptimas en un sistema de biodigestión.

¹ Unión temporal Residuos Verdes. ESTADÍSTICAS DE PRODUCCIÓN DE RESIDUOS VEGETALES en La Central de Abastos Bogotá, 2015

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la producción de biogás bajo las condiciones de operación del biodigestor a partir de residuos vegetales disponibles en la central de abastos de Bogotá D.C.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los residuos vegetales y condiciones de operación del sistema de biodigestión disponible en Corabastos Bogotá.
- Formular mezclas a partir de los residuos vegetales que permitan implementarse como sustrato, bajo las condiciones de operación de un prototipo de biodigestor a escala piloto.
- Realizar el proceso de digestión anaerobia con los sustratos formulados evaluando los parámetros de operación.
- Seleccionar el mejor sustrato para la producción del biogás empleando un modelo estadístico.

1. MARCO TEÓRICO

Debido a la alta disposición de residuos orgánicos que llegan diariamente a las centrales de abastos de todo el país y los cuales son dispuestos en rellenos sanitarios, ocasionando altos costos de transporte, así como malos olores por su descomposición, hace necesaria una alternativa para su tratamiento como lo es mediante digestión anaerobia, en la cual durante un periodo de tiempo estos residuos son degradados por microorganismos en ausencia de oxígeno y dando como producto final el biogás, que se compone de aproximadamente 60% de metano (CH₄) y 40% de dióxido de carbono (CO₂). Contiene mínimas cantidades de otros gases, entre ellos ácido sulfhídrico (H₂S). Es un poco más liviano que el aire, posee una temperatura de inflamación de 700°C, su llama alcanza una temperatura de 870°C, el metano tiene un alto valor calórico (19.6 a 25 MJ/ m³). Los rangos de sus componentes principales se indican en la **tabla 1**².

Tabla 1. Composición química del biogás

ELEMENTO	PROCENTAJE (%)
METANO	50-70
DIOXIDO DE CARBONO	30-50
NITROGENO	0,5-3
ACIDO SULFIHÍDRICO	0,1-1
VAPOR DE AGUA	TRAZAS

Fuente: Estudio sobre potencial de desarrollo de iniciativas de biogás a nivel productivo en honduras¹

1.1 TIPOS DE RESIDUOS PRESENTES EN CORABASTOS BOGOTÁ

A la central de CORABASTOS ingresan aproximadamente 12.400 toneladas al año³ de alimentos de origen agrícola y procesado de los cuales se clasifican en 70% de residuos vegetales y 30% de residuos sólidos inorgánicos como se puede observar en la **Tabla 2**.

² HERNÁNDEZ Evelyn, SAMAYOAS Vetlana, ÁLVAREZ Erwin, TALAVERA Carlos. Estudio sobre potencial de desarrollo de iniciativas de biogás a nivel productivo en honduras. Enero de 2012. p. 21-188

³ Corporación de Abastos S.A. PLAN ESTRATEGICO DE MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS. Disponible en: <http://www.corabastos.com.co/sitio/index.php>

Tabla 2 Residuos generados en Corabastos en el año 2015

RECOLECCION DE RESIDUOS 2015 (Tn)					
MES	TOTAL MENSUAL	ORGANICO	RECICLADO	NO RECUPERADO	PROMEDIO DIARIO (Tn)
ENERO	3117	1998	99	1020	101
FEBRERO	2964	1894	65	1005	106
MARZO	2922	1790	58	1074	94
ABRIL	2599	1484	60	1055	87
MAYO	3078	2053	53	972	99
JUNIO	3418	2450	48	920	114
JULIO	3418	2423	58	937	110
AGOSTO	3115	2134	53	928	100
SEPTIEMBRE	2579	1683	42	854	86
OCTUBRE	2416	1589	49	778	78
NOVIEMBRE	2738	1921	48	769	91
DICIEMBRE	2585	1890	45	650	83
TOTAL ANUAL	34.949	23.309	678	10.962	96

Fuente. Unión temporal Residuos Verdes. Estadísticas de producción de residuos vegetales en La Central de Abastos Bogotá⁴.

1.1.1 Clasificación de los residuos. Del volumen total de residuos generados en las plazas de mercado se obtiene una alta cantidad de residuos de verduras con un promedio de 50%, le sigue las frutas y hortalizas. En CORABASTOS, la descarga de frutas, verduras, hierbas, plátano y hortalizas, es la actividad que genera mayor cantidad de residuos³. Existen varias clasificaciones de residuos para ser aprovechados como materia prima para la producción de biogás. “La mayoría de la materia orgánica que contiene proteína, grasas, carbohidratos o de celulosa (excepto los aceites minerales y lignina) pueden ser transformados microbiológicamente en biogás”⁵. En términos de aprovechamiento, los residuos se pueden agrupar de acuerdo a su origen, ya sea de tipo vegetal o animal, también por su capacidad de degradación, por el contenido de humedad y su tamaño promedio.

⁴ Unión temporal Residuos Verdes. ESTADÍSTICAS DE PRODUCCIÓN DE RESIDUOS VEGETALES en La Central de Abastos Bogotá, 2015.

⁵ GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto, et al. BIOGAS. Alternativa Ambiental En El Manejo De Residuos Para Su Uso Como Energético Sustentable. España: Academia Española, 2014. p. 145978-3-659-07190-4

La biodegradabilidad de estos residuos está relacionada en función del contenido de biomoléculas degradables tales como azúcares de bajo peso molecular, hemicelulosa y celulosa, y se clasifican en:

- **Residuos orgánicos:** Estos tipo de residuos son aquellos que se descomponen naturalmente transformándose en otro tipo de materia orgánica, son biodegradables⁶.
- **Residuos inorgánicos:** Son residuos que por sus características químicas sufren una descomposición natural lenta, algunos de ellos son de origen natural pero no son biodegradables⁷.

Estos residuos también se pueden clasificar de acuerdo a su apariencia física y a sus características cuantitativas, como el porcentaje de sólidos totales, volátiles y principalmente la demanda química de oxígeno.

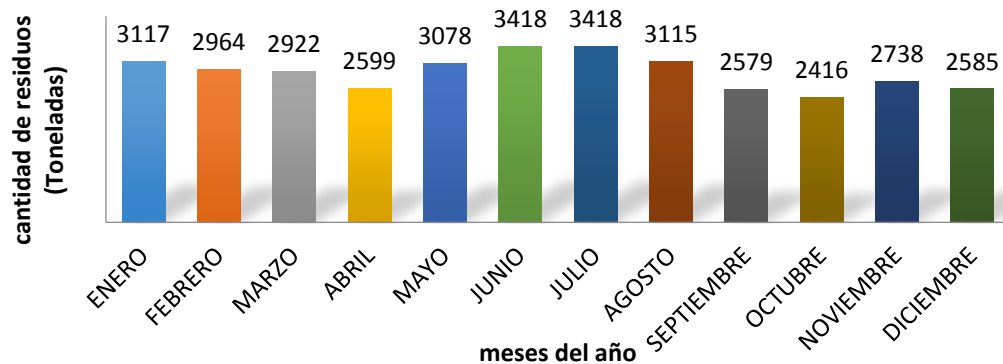
1.1.2 Características de los residuos vegetales. La principal característica que presentan los residuos vegetales y por lo que constituyen un sustrato apropiado para su utilización por medio de digestión anaerobia, es que la mayoría de estos residuos tiene un alto porcentaje de nitrógeno, y una relación C/N generalmente alta, aunque con notables diferencias según la naturaleza y composición del residuo.

1.1.3 Estadísticas. De acuerdo a las estadísticas obtenidas por CORABASTOS Bogotá se puede observar los meses de mayor cantidad de residuos por cosecha de productos vegetales y hortalizas que llegan a la central.

⁶ GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto, et al. BIOGAS. Op.cit,

⁷ Ibid.,p

Grafica 1 Recolección de residuos 2015 en Corabastos



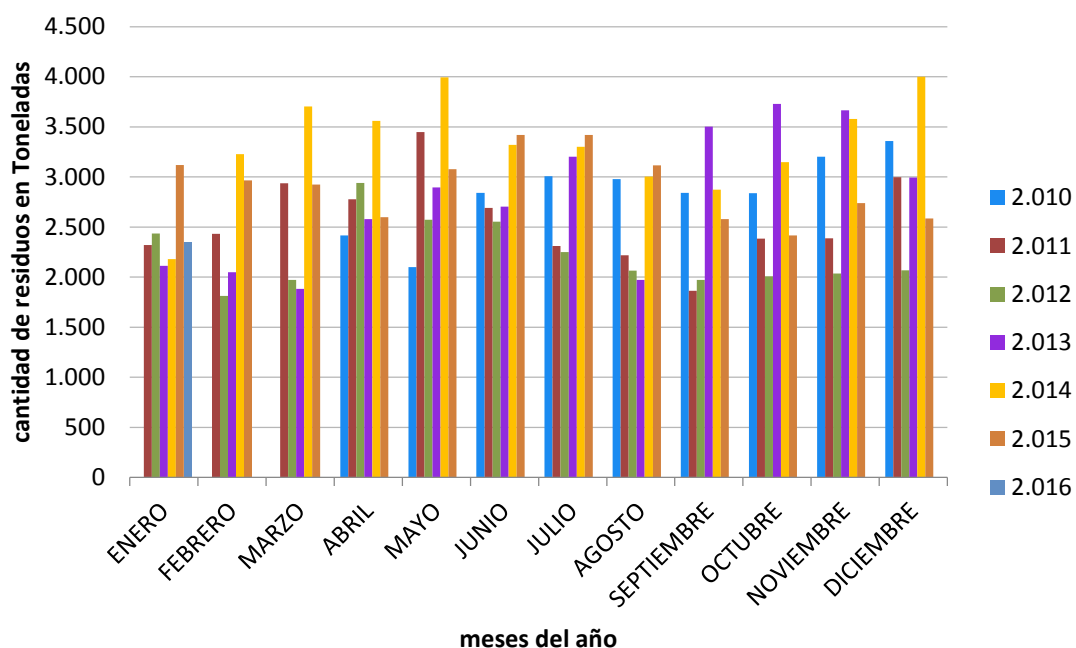
Fuente. Unión temporal Residuos Verdes. Estadísticas de producción de residuos vegetales en La Central de Abastos Bogotá⁸.

Los residuos y material vegetal que se origina en las actividades comerciales de la Central de abastos, son productos como hortalizas, leguminosas, frutos, papas, y verduras. Así mismo, se generan residuos de acelga, apio, cilantro, coliflor, repollo y lechuga, tomate, pimentón, habichuela, cebolla, calabaza, arveja, haba y pepino papa, plátanos y otras frutas y hortalizas estacionarias, las cuales en algunas ocasiones son distribuidas de acuerdo al estado en que se encuentran, para alimento de animales o constituyen materia prima para procesos de compostaje y abonos orgánicos⁹. En la **(Grafica 1.)** se puede observar el total de recolección de estos residuos mensualmente hasta el año 2015 y el mes de enero de 2016.

⁸ Unión temporal Residuos Verdes. Op. cit.

⁹ Corporación de Abastos S.A. PLAN ESTRATEGICO DE MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS. Op.cit.

Grafica 2. Sumatoria de Recolección de residuos en los últimos 6 años en Corabastos



Fuente: Unión temporal Residuos Verdes. Estadísticas de producción de residuos vegetales en La Central de Abastos Bogotá¹⁰.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE BIODIGESTIÓN

El proceso de Digestión anaerobia está dado por la descomposición microbiológica de la materia orgánica o biomasa, en un entorno húmedo en ausencia de oxígeno.

Dentro de este proceso la población microbiana desempeñan un papel importante especialmente si se considera que disponen de un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno, Dentro de este grupo de microorganismos intervienen las bacterias anaerobias facultativas quienes pueden desarrollar un metabolismo tanto respiratorio aprovechando el oxígeno, como fermentativo en ausencia de oxígeno, y las cuales utilizan en forma secuencial los productos metabólicos generados en cada etapa que interviene en el proceso¹¹.

¹⁰ Unión temporal Residuos Verdes. Op. cit.

¹¹ Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. MANUAL DE BIOGÁS. Santiago de Chile: 2011. p.19. ISBN, 119978-95-306892

1.2.1 Etapas del proceso. El sistema de biodigestión se divide en 4 etapas fundamentales, las cuales se describen a continuación:

1.2.1.1 Hidrólisis. En esta etapa ocurre la hidrólisis de polisacáridos, proteínas y lípidos a partir de la acción de bacterias hidrolíticas y fermentativas generando productos con moléculas de bajo peso molecular como los azúcares, los aminoácidos, los ácidos grasos y los alcoholes, estas moléculas son transportadas a través de la membrana celular para ser fermentados a ácidos acético, fórmico, propiónico y butírico siendo estos ácidos grasos con bajo número de carbonos, así como también a compuestos reducidos como el etanol, además de hidrogeno y dióxido de carbono¹². Según diversos autores y experimentaciones la hidrolisis puede ser la etapa limitante de la velocidad del proceso, principalmente por la presencia de residuos con alto contenido de sólidos, y estos materiales están compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, siendo esta última la más resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos generando una velocidad bastante lenta para el proceso y afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono.

Esta etapa del proceso depende principalmente de variables como la temperatura, del nivel de pH, de la concentración de amoníaco y de los productos de la hidrólisis, ya mencionados anteriormente, del tiempo de retención hidráulico, del porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas que contenga la biomasa, así como del tamaño de partículas la cual diversos autores recomiendan de aproximadamente 2mm, con el fin de aumentar la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas, convirtiéndose en un pretratamiento fisicoquímico fundamental para el proceso aumentando la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, genera un beneficio produciendo menores tiempos de retención y menores tamaños de reactor¹³.

1.2.1.2 Acidogénesis. Es la segunda etapa, y allí ocurre la formación de ácido, en donde los productos de la hidrolisis se convierten en compuestos orgánicos solubles complejos y se dividen en ácidos orgánicos de cadena corta. “Durante esta etapa se lleva a cabo la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias

¹² DÍAS BÁEZ María consuelo, ESPITIAVARGAS Sandra Eliana, MOLINAPÉREZ Francisco. Digestión Anaerobia. 2002. p.37-62

¹³ Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Op.cit., p.19-21

metanogénicas y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente)”¹⁴. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias radica principalmente en la producción del alimento para los grupos de bacterias que actúan en las etapas posteriores, además eliminan las trazas de oxígeno que puedan haber disuelto en el sistema, debido a que se compone de bacterias facultativas denominadas bacterias formadoras de ácidos.

1.2.1.3 Acetogénesis. En esta etapa los productos de la etapa anterior como el propionato, butirato y etanol deben ser oxidados a acetato, anhídrido carbónico e hidrógeno, para que ocurra una metanogénesis eficiente, siendo este último un factor importante en la regulación de la degradación anaerobia de compuestos orgánicos. En la etapa acetogénica la mayoría de las bacterias anaeróbicas ya han consumido todo el alimento presente de la biomasa y los productos generados son los que las bacterias metanogénicas utilizarán como sustrato¹⁵.

1.2.1.4 Metanogénesis. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes en el proceso de digestión anaerobia, ya que como su nombre lo indica son los responsables de la formación del gas metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores. La degradación de residuos pobres en celulosa está más limitada por esta etapa que por la hidrólisis debido a que estos residuos se transforman rápidamente a ácidos grasos volátiles y pueden llegar a presentar una inhibición acidificando el medio, ya que las bacterias fermentativas producen ácido con una velocidad ocho veces más rápida comparada con la que las bacterias metanogénicas consumen estos ácidos productos de la fermentación¹⁶.

1.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

En el proceso de tratamiento anaerobio de la materia orgánica, se requiere de las siguientes condiciones:

1.3.1 Tipo de sustrato. Dependiendo de la biomasa a utilizar para este proceso se puede predecir la comunidad que se desarrolla en la cámara del digestor, y el tamaño de cada grupo de organismos deberá ser proporcional al flujo del sustrato en el medio así como la prevalencia de algunas rutas metabólicas estará

¹⁴ Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Op.cit., p.20

¹⁵ Ibid., p.35-44

¹⁶ Ibid., p.37

determinada por la relación entre la velocidad de producción y la capacidad de asimilación del mismo, por lo tanto si las diferencias entre el contenido de DQO y DBO son grandes esto indicara que existe una alta proporción de componentes no biodegradables¹⁷.

1.3.2 Velocidad de carga orgánica y Tiempo de retención. El tiempo de retención hidráulico es el tiempo promedio de permanencia del material orgánico o biomasa en el reactor, y la velocidad de carga orgánica es la cantidad del residuo cargado al digester por unidad de volumen. Este tiempo de retención está directamente relacionado con la temperatura que se da en el proceso, varios autores han demostrado que a mayor temperatura se logran menores tiempos de retención pero cuando esta es baja el tiempo de retención será más largo, y para disminuir estos tiempos diversas investigaciones muestran diversos pretratamientos, uno de ellos es recircular la materia orgánica en la fase hidrolítica y acidogénica durante dos horas, ya que según (Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility, 2011)¹⁸ el agitar la mezcla permite que los compuestos orgánicos solubles y coloidales se degraden en primer término, con un tiempo de retención hidráulica de 12 a 24 horas y este tiempo puede variar entre 15 a 30 días para la digestión mesofílica y entre 5 a 15 días para la digestión termofílica.

1.3.3 Temperatura. como se mencionó anteriormente este factor es uno de los más importantes para que se lleve a cabo el proceso en las mejores condiciones para los microorganismos. La digestión anaerobia se puede llevar a cabo en un amplio rango de temperaturas los cuales son: psicrófilos (<20°C), mesofílicos (20-40°C), y termofílicos (45-70°C) e incluso extremos de termófilos (>60°C). En este proceso las tasas de crecimiento aumentan exponencialmente con la temperatura, de tal manera si ocurre un aumento arbitrario de la temperatura, este alteraría las macromoléculas e impediría su metabolismo, y la tasa de crecimiento experimenta una disminución exponencial si la temperatura óptima se supera¹⁹. De esta manera, para lograr un funcionamiento adecuado del proceso, la temperatura debe mantenerse estable, ya que esos cambios disminuyen la productividad en la obtención del biogás deseado, por tanto es preferible, la digestión mesofílica, con

¹⁷ DÍAS BÁEZ María consuelo, ESPITIAVARGAS Sandra Eliana, MOLINAPÉREZ Francisco. Digestión Anaerobia. Op. cit., p. 88

¹⁸ Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Op.cit., p.86

¹⁹ GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto, et al. BIOGAS. Alternativa Ambiental En El Manejo De Residuos Para Su Uso Como Energético Sustentable. España: Academia Española, 2014. ISBN. 145978-3-659-07190-4

temperatura controlada en un estado de rango medio, ya que a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias que tendrán menor actividad degraden la materia orgánica, y a mayores temperaturas el proceso es más costoso y no tan rentable.

Los rangos de temperatura de acuerdo al tiempo de retención hidráulica son los siguientes:

- **Digestión Psicrófila:** los rangos de temperaturas se encuentran entre 10°C y 20°C y la carga debe permanecer en el digestor más de 100 días.
- **Digestión Mesófila:** Se realiza a temperaturas entre 30°C y 35°C, se encuentra en un rango medio y de fácil control, para el proceso es preferible temperaturas más altas pero se requieren digestores de gran tamaño, por lo que se aconseja este rango mesofílico.
- **Digestión Termófila:** se realiza el proceso de digestión anaerobia a temperaturas mayores de 55°C y el tiempo de permanencia debe ser de 12 a 14 días, generando de esta manera una producción de metano más alta, así como mejor eliminación de patógenos y virus, sin embargo requieren tecnología más costosa y consumen más energía.²⁰

1.3.4 pH. Es uno de los parámetros fundamentales que influyen en el proceso de digestión anaerobia, ya que determina la inhibición o toxicidad de las bacterias metanogénicas, el crecimiento óptimo de cada uno de los grupos microbianos presentes en la degradación anaeróbica va determinada y estrechamente relacionada con el pH, puesto que este impacta la actividad enzimática de los microorganismos.

El rango de pH óptimo depende de cada etapa del proceso, para la etapa de hidrólisis y acidogénica el pH va de un máximo de 8 a un mínimo de 4 y principalmente en la fase metanogénica este factor es de mucha importancia porque el pH no debe ser menor a 6,6, este debe mantenerse cercano a la neutralidad para no afectar el proceso²¹.

²⁰ PEÑA MARTÍN, Gonzalo. Tabla de composición de alimentos. Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. Guía Para La Implementación De Sistemas De Producción De Biogás. 01 ed. Bogotá D.C: 2003.

²¹ Ibid., p.34,35

Los valores de pH pueden ser corregidos y de esta manera mantenerlos en el rango óptimo para la fermentación, por lo tanto cuando aumenta el pH se puede sacar frecuentemente una pequeña cantidad de efluente y a su vez agregar materia orgánica fresca en la misma proporción y cuando disminuye el pH se pueden agregar fertilizante, cenizas, o agua amoniacal diluida.

1.3.5 Humedad. Este factor se expresa como una relación de masa de agua por masa de materia seca. “Una materia orgánica con porcentajes de humedad superior al 50% puede ser aprovechada energéticamente mediante un proceso bioquímico como la fermentación o la digestión anaerobia”²².

1.3.6 Macronutrientes y Micronutrientes. Estos factores son de gran importancia al momento de elegir a que residuo se le realizara un tratamiento por digestión anaerobia debido a que el Carbono y Nitrógeno son los principales componentes que requieren los microorganismos en cantidades relevantes, ya que su base estructural está compuesta por ellos. En cuanto al carbono la mayoría de los micoorganismos son heterótrofos e implementan distintas rutas para obtenerlo, mediante sistemas enzimáticos permitiendo hidrolizarlos a compuestos orgánicos sencillos (carbohidratos, ácidos orgánicos o aminoácidos), hasta estructuras más complejas (lignina o los ácidos húmicos). Por otra parte, los microorganismos pueden utilizar cualquier compuesto de Nitrógeno, desde las formas más reducidas como NH^4 , aminas, amidas, nitrilos y aminoácidos, hasta las más oxidadas tales como óxidos de nitrógeno, los nitritos y nitratos. “El nitrógeno celular se encuentra en su forma más reducida, es decir un compuesto que contenga este componente antes de asimilarlo en el interior de la célula, este deberá ser reducido, luego este nitrógeno es utilizado para la síntesis de aminoácidos y otros compuestos orgánicos”²³.

- El Fosforo (P) está presente en la naturaleza en forma de fosfatos orgánicos e inorgánicos, contribuyendo a la síntesis de ácidos nucleicos y fosfolípidos.
- El Azufre (S) el cual es un macronutriente presente en fuentes inorgánicas como sulfatos o sulfuros, es un componente de los aminoácidos cisteína y metionina, estando presente en algunas vitaminas, como tiamina, biotina, ácido lipoico y Coenzima A.
- El Potasio (K) es necesario para todos los organismos, ya que funciona como un cofactor de muchas enzimas, especialmente en la de síntesis de proteínas.

²² Ibid., p. 134

²³ MANZANILLA LÓPEZ, Rosa y MARBÁN MENDOZA, Nahúm. Aspectos Biológicos De La Estabilización Aeróbica II. Mundi Prensa Libros, 2012. ISBN 9788484765677

- El Magnesio (Mg) funciona como estabilizador de los ribosomas, las membranas celulares y los ácidos nucleicos. También funciona como un cofactor en muchas reacciones enzimáticas, particularmente en las de transferencia de grupos fosfatos.
- El Calcio (Ca) ayuda a estabilizar la pared celular bacteriana y tiene una función importante en la termo resistencia de las endoesporas.
- El Sodio (Na) es requerido por algunos microorganismos que están presentes en ambientes salinos.
- El Hierro (Fe) es fundamental en la respiración celular, permitiendo el transporte de electrones mediante los citocromos y de proteínas que contienen Fe y S. su función depende del estado de oxidación en el cual este presente, ya que en condiciones aeróbicas suele estar en el estado de oxidación (Fe^{+3}) y forma varios minerales insolubles, para obtener este macronutriente de dichos minerales, las células producen agentes llamados Sideróforos, los cuales permiten solubilizar el Fe mediante la derivación del ácido hidroxámico, catecol (enterobactinas) u otros de naturaleza péptida, cuando se introduce en el interior de la célula se lleva a cabo una reacción de reducción, posteriormente el sideróforo sale al exterior de la célula. Por otra parte, cuando está en condiciones anaeróbicas, el Fe se encuentra en el estado de oxidación (Fe^{+2}) siendo soluble. Es necesario que el Fe este en mayores cantidades en consideración a otros metales²⁴.

Cuando se habla de **proteínas** se hace referencia a compuestos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, en cuanto a las **grasas y aceites**, son triglicéridos denominados ésteres de la glicerina; y están constituidos por ácidos grasos de cadena larga de hidrocarburos. A temperatura ambiente a un triglicérido en estado sólido se le conoce como grasa, y en estado líquido se dice que es un aceite²⁵.

Los micronutrientes desempeñan un papel fundamental durante el funcionamiento celular como los macronutrientes, actúan como cofactores de enzimas permitiendo llevar a cabo rutas metabólicas que se dan durante la degradación de la materia orgánica.

- El Cobalto constituye en parte la vitamina B₁₂ y algunas transcarboxilasas.
- El Cobre está presente en algunos citocromos y superóxido dismutasa.

²⁴ MANZANILLA LÓPEZ, Rosa y MARBÁN MENDOZA, Nahúm. Aspectos Biológicos De La Estabilización Aeróbica II. Op.cit.,p

²⁵ ESCALANTE HERNANDEZ, Humberto, et al. Atlas Del Potencial Energético De La Biomasa Residual En Colombia. Op.cit., p. 135

- El Manganeso funciona como un activador de algunas enzimas y forma parte de algunas superóxidasas.
- El Molibdeno está presente en flavinas, nitrato reductasas y nitrogenasas.
- El Níquel está presente en la mayoría de las hidrogenasas, en algunas deshidrogenasas y en la ureasa.
- El Selenio se puede encontrar en algunas hidrogenasas y en el formato deshidrogenasa.
- El Wolframio constituye las oxotransferasas de algunas bacterias.
- El Vanadio forma parte de algunas nitrogenasas.
- El Zinc está presente en el ARN y ADN polimerasa, y hace parte de algunas proteínas de que enlazan el ADN.

Los denominados factores de crecimiento que involucran las vitaminas, aminoácidos, purinas y pirimidinas. Son compuestos orgánicos que se necesitan en muy pequeñas cantidades y sólo por algunas células. La mayoría de los microorganismos son capaces de sintetizar estos compuestos, pero en algunos casos es necesario añadirlos al medio. Las vitaminas son los factores de crecimiento más demandados funcionan formando parte de coenzimas, entre las más requeridas están la tiamina (vitamina B1) biotina, piridoxina (vitamina B6) y covalamina (vitamina B12)²⁶.

1.3.7 Relación C/N. Debido a que los materiales de fermentación están compuestos en su mayor parte por carbono (C) y nitrógeno (N) y siendo estas las macromoléculas más abundantes en el medio ambiente, se establecen la relación entre ellos (C/N), la cual influye sobre la producción de biogás, siendo el carbono la fuente de energía de los microorganismos y el nitrógeno utilizado para la formación de nuevas células. “Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1”²⁷

En el proceso microbiológico también deben estar presentes y en equilibrio sales minerales tales como el azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel, entre otras en menor proporción²⁸.

²⁶ MANZANILLA LÓPEZ, Rosa y MARBÁN MENDOZA, Nahúm. Aspectos Biológicos De La Estabilización Aeróbica II.Op,cit.,p

²⁷ Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Op.cit., p.35

²⁸ Ibd.,p.36

1.3.8 Inhibición y Toxicidad. Uno de los principales parámetros que se debe tener en cuenta para determinar el estado del proceso en un digestor es la medición de aquellos factores que pueden generar la inhibición del proceso, especialmente la última etapa y la más importante, la metanogénesis. Dentro de estos tipos de factores se encuentran; la acidificación a partir del acetato, ya que por el exceso del sustrato se inhibe la producción de metano cuando la producción de ácidos excede su consumo, otro factor es la alta presencia de amoníaco, la cantidad que resulta inhibitoria depende además del pH, de la concentración de sustrato, de la relación C/N, de la capacidad taponadora del medio y de la temperatura, también los fenoles y alquilfenoles se consideran tóxicos para las bacterias metanogénica. La transferencia de dióxido de carbono a través de la interface gas-liquido es limitante de la digestión anaerobia ya que un incremento rápido en la producción de dióxido de carbono genera una disminución de las mismas proporciones en la producción de metano y a la vez una acumulación de ácido acético; por el contrario una disminución brusca de la producción de CO₂ resulta en un incremento rápido de la producción de metano²⁹.

1.4 MICROORGANISMOS PRESENTES EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Diversas poblaciones microbianas constituidas por bacterias que degradan de manera secuencial la materia orgánica en ausencia de oxígeno, los microorganismos allí presentes dependen de las condiciones nutricionales y fisicoquímicas, estos microorganismos son los elementos clave del proceso.

1.4.1 Recuento Bacteriano. En el proceso de fermentación en ausencia de oxígeno interviene distintos tipos de bacterias anaerobias facultativas y anaerobias estrictas dependiendo de cada etapa del proceso.

1.4.2 Bacterias Hidrolíticas. Estos tipos de bacterias son las encargadas de romper las moléculas de polisacáridos, proteínas y grasas e hidrolizarlas a compuestos más simples como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos.

Las bacterias que llevan a cabo estas reacciones son anaerobias facultativas y los géneros más frecuentes que llevan a cabo esta reacción son los miembros de la

²⁹ HANSSON G., MOLIN. End Product Inhibition in Methane Fermentation: Effects of Carbon Dioxide and Methane on Methenogenic Bacteria Utilizing Acetate. *European J.Appl. Microbiol.Biotechnol*, 1981. p. 236-247

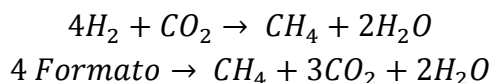
familia *Enterobacteriaceae* además de los géneros *Bacillus*, *Peptostreptococcus*, *Propionibacterium*, *Bacterioides* *Micrococcus* y *Clostridium*³⁰.

1.4.3 Bacterias Acidogénicas. Los productos de la etapa anterior como el propionato y el butirato son oxidados a acetato, dióxido de carbono e hidrogeno mediante un grupo de microorganismos acetogenos productores obligados de hidrogeno, de las cuales solamente un limitado número de especies han sido aisladas y dentro de las cuales se pueden mencionar: ***Syntrophobacter sapovorans***: oxida ácidos grasos de 4 a 8 carbonos y algunos ácidos grasos insaturados produciendo acetato, CO₂ e H₂. ***Syntrophobacter wolinii***: oxida propionato generando acetato, CO₂ e H₂. ***Syntromonas wolfei***: oxida ácidos monocarboxilicos saturados de 4 a 8 carbonos a acetato e hidrogeno. ***Syntrophospira bryantii***: oxida ácidos grasos de 4 a 11 carbonos. ***Syntrophus buswellii***: oxida el benzoato³¹.

1.4.4 Bacterias Metanogénicas. Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas y producen metano como principal producto y a pesar de los requerimientos estrictos y el metabolismo especializado de este grupo, estas bacterias se encuentran ampliamente distribuidas en la naturaleza. Con base en el tipo de sustrato utilizado, las bacterias metanogénicas se subdividen en tres grupos³².

Grupo 1. Utiliza como fuente de energía el hidrógeno, formato y ciertos alcoholes. La reducción de CO₂ es importante para mantener una baja concentración de H₂ y formato, condición indispensable para los procesos de transferencia inter específica de electrones.

Reacciones:



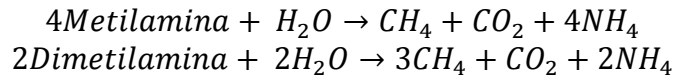
Grupo 2. Algunas de las moléculas son oxidadas a CO₂, el cual actúa como aceptor final de electrones y se reduce directamente a CH₄. El metanol es consumido más rápidamente y el metabolismo de la aminas metiladas a CH₄, conlleva a la producción de amonio, el cual es utilizado como fuente de nitrógeno.

³⁰ DÍAS BÁEZ María consuelo, ESPITIAVARGAS Sandra Eliana, MOLINAPÉREZ Francisco.Op.Cit.,P.45

³¹ DÍAS BÁEZ María consuelo, ESPITIAVARGAS Sandra Eliana, MOLINAPÉREZ Francisco.Op.Cit P. 50,51

³² Ibid.,P.58,59

Reacciones:



Grupo 3. Aunque la mayor parte del metano que se genera en la naturaleza proviene del rompimiento del acetato, la habilidad de catabolizar este sustrato está limitada a los géneros: *Methanosarcina* y *Methanosaeta*. El carbono metilado del acetato es reducido directamente a metano y el grupo carboxilo es oxidado a CO₂. El acetato es utilizado como fuente de carbono y de energía, sin embargo, la energía que se obtiene a partir del acetato es poca.

1.5 TIPOS DE BIODIGESTORES

Los digestores son los equipos en los cuales se lleva a cabo el proceso anaerobico y su diseño debe ser tal que asegure homogeneidad entre los componentes del sistema y condiciones óptimas necesarias para el crecimiento microbiano y la obtención del producto deseado, de acuerdo a esto hay una gran variedad de digestores presentes en el mercado, con diferenciaciones que van desde los parámetros de volumen, hasta modelos conceptualmente diferentes, modificando el número de tanques de proceso, la orientación de los mismos, los sistemas de movilización de biomasa, entre otros³³.

1.5.1 Ventajas de los biodigestores. El empleo de la digestión anaerobia mediante un sistema de biodigestión adecuado tiene varias ventajas medioambientales como:

- La Reducción en la contaminación ambiental debido a que la carga orgánica presente en el biodigestor anaerobio, destruye a todos los microorganismos aerobios encontrados en las excretas, estas contienen “microorganismos patógenos, larvas, huevos, pupas de invertebrados que de otro modo podrían convertirse en plagas y enfermedades para las plantas cultivadas. aumentando la protección del suelo, de las fuentes de agua, de la pureza del aire y del bosque”³⁴

³³ GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto, et al. BIOGAS. Alternativa Ambiental En El Manejo De Residuos Para Su Uso Como Energético Sustentable. España. Op.cit., p.

³⁴ Universo Porcino. Beneficios en el uso de biodigestores. Argentina. Disponible en: http://www.aacporcinos.com.ar/articulos/internacionales_porcinas_01-2011_beneficios_en_el_uso_de_biodigestores.html

- La degradación parcial de dicha biomasa en biogás (metano y algunos subproductos) proporcionando energía a bajo costo.
- Mediante la utilización del efluente como bioabono se reduce el uso de fertilizantes químicos, cuya producción y aplicación tiene consecuencias negativas para el medio ambiente global y local.

1.5.2 Desventajas de los biodigestores. Este tipo de sistemas presenta un factor limitante el cual es el oxígeno (abundante en la biosfera), mientras que las bacterias anoxigénicas (organismos foto autótrofos) deben controlar el pH de su medio (proceso difícil de realizar por las bacterias) y garantizar además poca presencia del oxígeno³⁵.

- En la digestión aerobia se implementan varios tipos de bacterias, todas las que el sistema pueda permitir. En cambio la digestión anaerobia precisa de bacterias concretas (por cada fase), y muy coordinadas a condiciones de operación estrictas para evitar su inhibición.
- Las metano bacterias presente en la última fase de dicho sistema, pueden llegar a establecer una inhibición por diferentes compuestos, ya sean de tipo orgánicos o inorgánicos. Este es uno de los factores primordiales que se debe establecer un buen control, debido a que es muy frecuente en este tipo de proceso.

1.5.3 Eficiencia. El proceso anaerobio supone una menor eficiencia, ya que su rendimiento ecológico es más bajo, al transformar menos materia orgánica en biomasa (remoción de MO aprox.80%). Siendo relevante para la obtención de cantidad de biogás (metano).

1.6 CLASES DE BIODIGESTORES

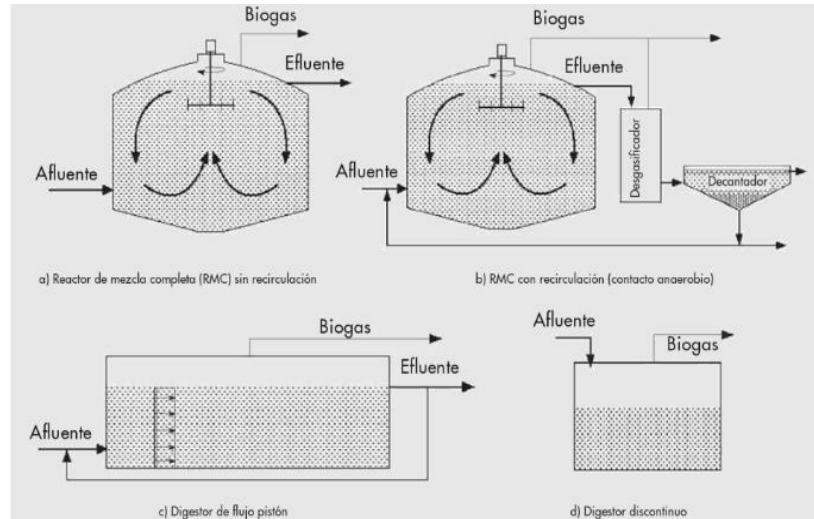
Existe una amplia variedad de digestores existentes en el mercado, los cuales son diferenciados de acuerdo a sus parámetros, como el volumen, modelos conceptuales distintos, número de tanques presentes asemejando cada etapa del proceso, su orientación, recirculación, entre otros.

Existen dos tipos de biodigestores principalmente según se dispongan o no de sistemas de retención de biomasa.

³⁵ GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto, et al. BIOGAS. Alternativa Ambiental En El Manejo De Residuos Para Su Uso Como Energético Sustentable. España. Op.cit., p.

1.6.1 Reactores sin retención interior de biomasa.

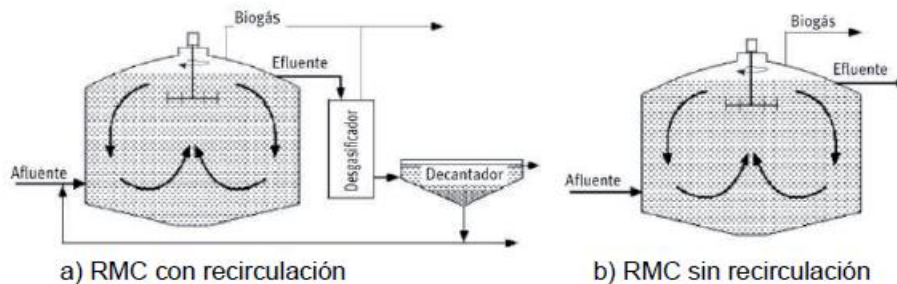
Figura 1 Esquema de reactores sin retención interior de biomasa.



Fuente Procesos Biológicos: La Digestión Anaerobia y El Compostaje³⁶

A. Reactores de mezcla completa (RMC). Existen dos tipos, con y sin recirculación.

Figura 2 Esquema de reactores de mezcla completa sin y con recirculación.



Fuente. Procesos Biológicos: La Digestión Anaerobia y El Compostaje³⁷

a. El reactor con recirculación se denomina reactor anaerobio de contacto, en él se presenta una recirculación por lo que es posible conseguir tiempos de

³⁶ CAMPOS, Elena; ELÍAS CASTELLS, Xavier y FLOTATS, Xavier. Procesos Biológicos: La Digestión Anaerobia y El Compostaje. España: Ediciones Díaz de Santos, 2012. 9788499691336

³⁷ Ibid., p.623

retención hidráulica más bajos comparados con un reactor simple de mezcla completa³⁸.

- b. Reactor sin recirculación, consiste básicamente en un digestor con un sistema de agitación.

Debido a la necesidad de separar los microorganismos en el decantador, este sistema solo es aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica para las que sea posible una separación líquido-sólido.

- B. Reactor de flujo pistón.** Mediante el desplazamiento horizontal de la carga orgánica, mezclándose mínimamente³⁹. En este sentido las secciones presentan estados fermentativos diferentes, debido a esto presenta problemas de homogeneidad. “También presenta tiempos de retención más bajos que el equivalente a una mezcla completa, lo que implica menores volúmenes en el reactor, reduciendo la inversión, por otra parte presenta una complejidad en la operación, reduciendo así su implementación en volúmenes pequeños de reacción”⁴⁰.

- C. Digestor discontinuo.** En este tipo de biodigestores la materia orgánica se mantiene dentro del digestor por largos periodos de tiempo y se cargan una sola vez hasta finalizar el proceso. En cuanto a la descarga se lleva a cabo al momento que ha dejado de producir gas, y para conseguir una producción de biogás cercana a la continuidad, estos digestores deben combinarse con otros digestores cuya puesta en marcha en lapsos de tiempos posteriores, y a diferencia de los digestores continuos, presentan mayor eficiencia en el tratamiento de materiales lignocelulósicos, evitando taponamientos en el proceso⁴¹.

³⁸ CAMPOS, Elena; ELÍAS CASTELLS, Xavier y FLOTATS, Xavier. Op.cit., p.625

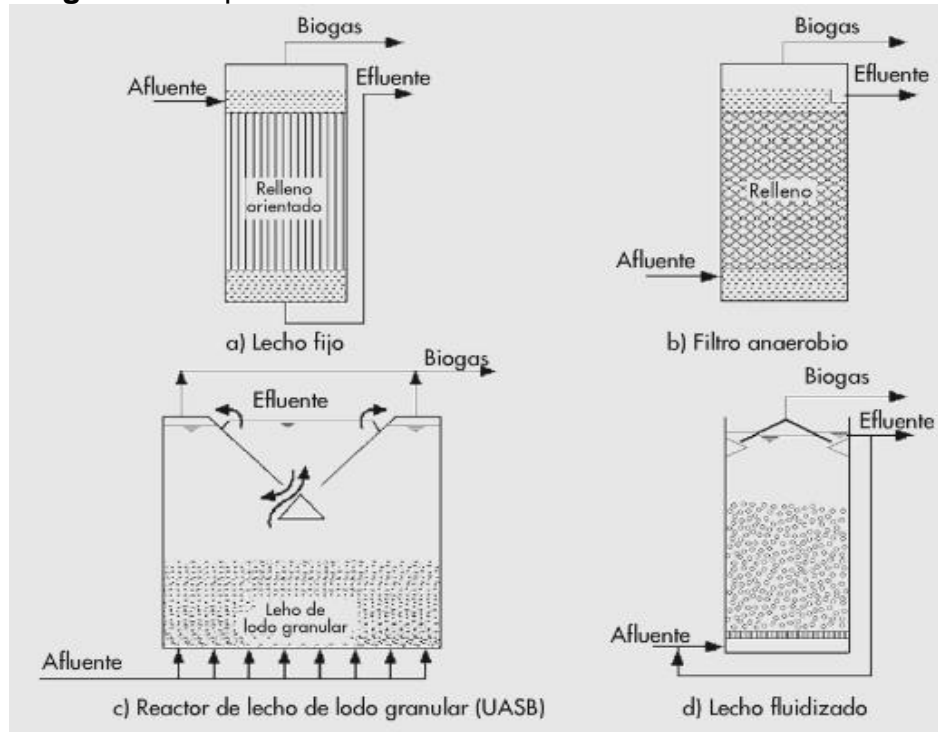
³⁹ GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto, et al. BIOGAS. Op.cit.,p.62

⁴⁰ CAMPOS, Elena; ELÍAS CASTELLS, Xavier y FLOTATS, Xavier. Op.cit.,p.63

⁴¹ Ibid., p.626.

1.6.2 Reactores con retención de biomasa.

Figura 3 Esquema de reactores con retención de biomasa



Fuente. Procesos Biológicos: La Digestión Anaerobia y El Compostaje⁴²

- A. Reactor de lecho fijo.** Este tipo de reactores son apropiados para tratar biomasa con elevada materia en suspensión, como en el caso del tratamiento de aguas residuales, para este reactor el flujo puede ser ascendente o descendente y también presentan un manto de material inerte en donde gran parte de los microorganismos quedan retenidos en el manto y el flujo del líquido por este manto genera la mezcla afluente-biomasa⁴³.
- B. Reactores de lecho fluidizado.** En este sistema las bacterias se encuentran fijadas, formando una biopelícula sobre pequeñas partículas de material mediante el flujo ascendente del fluido. Para mantener el caudal adecuado, que permita la expansión y fluidización del lecho, se recurre a la recirculación⁴⁴.

⁴² CAMPOS, Elena; ELÍAS CASTELLS, Xavier y FLOTATS, Xavier. Op.cit., p.626, 627.

⁴³ Ibid., p 627

⁴⁴ Ibid., p.627,628

- C. Reactores de tipo UASB.** “Es un sistema trifásico de alta carga que opera como un sistema de crecimiento en suspensión, su funcionamiento consiste en una columna abierta, a través de la cual el líquido residual se pasa a una baja velocidad ascensional”, Cuenta con un separador de gases, solido-liquido, en la parte superior del reactor para retener lodo, también cuenta con un sistema de auto mezclado mediante el movimiento ascendente de las burbujas de gas y del flujo del líquido⁴⁵.
- D. Reactor filtro anaerobio.** Un filtro anaerobio puede clasificarse de manera ascendente y descendente, así como también de alimentación múltiple. Cuando se habla de un reactor de **flujo ascendente** la alimentación ingresa por la parte inferior y atraviesa todo el perfil longitudinal a través de un lecho de piedras para finalmente salir por la parte superior del reactor. En el reactor de **flujo descendente** su sistema es similar excepto que la biomasa es verdaderamente adherida al medio, y “en este sistema la alimentación se lleva a cabo por diversos puntos y tiene una utilización efectiva de todo el lecho del filtro con un volumen de trabajo de 87%, comparado con el 65% de un punto de alimentación simple”⁴⁶.
- E. Modelos tipo Batch por lotes.** Estos tipos de digestores se caracterizan principalmente porque el sustrato se carga o alimenta una sola vez, es utilizado para degradar materias primas sólidas, como restos vegetales y desechos sólidos orgánicos. El rendimiento volumétrico de gas para este tipo de digestores es superior a cualquier digestor continuo debido al contenido de solidos totales, así mismo tiene una producción eficiente y económica del metano.

También hay otra clasificación la cual se muestra a continuación:

1.6.3 Sistema mono etapa. En este sistema se lleva a cabo las cuatro fases del proceso de digestión anaerobia simultáneamente en un único reactor.

- **Características:** Este sistema es considerado “tradicional” de realizar el proceso de digestión anaerobia, debido a que las tres fases correspondientes a la degradación de materia orgánica se llevan a cabo en el mismo equipo. Funciona con un reactor en el cual se mantiene una mezcla homogénea del sustrato-

⁴⁵ GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto, et al. BIOGAS. Op.cit.,p.66

⁴⁶ Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Manual De Biogás. Santiago de Chile: 2011. ISBN. 119978-95-306892

microorganismos mediante un sistema de agitación, el cual puede ser mecánico o neumático (recirculación de biogás a presión).

- **Ventajas:** Este tipo de reactor y sistema no presenta problemas en el diseño y es implementado frecuentemente para la degradación de residuos.
- **Limitaciones:** A diferencia de otros reactores el tiempo de retención necesario para el proceso tiene que ser alto según lo evaluado en el informe del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía “la concentración de cualquier especie, que se mantiene en el reactor en régimen estacionario, es la misma que la que se pretende en el efluente”⁴⁷. También otra condición importante es la estabilidad del proceso, ya que este está limitado por el pH, debido a que estos sistemas suelen presentar acumulación de ácido propiónico, causando la disminución del pH, y de esta manera siendo relevante en la fase metanogénica, esta se debe llevar a cabo en un pH entre 6.8 y 7.2, si no se cumple estas condiciones se inhibe esta fase.

1.6.4 Sistema multietapa. En este sistema se dividen las fases presentes en el proceso.

- **Características:** A través del tiempo se ha venido intensificando la innovación en la tecnología implementada en los sistemas anaerobios, presentando una separación de las fases representativas de este proceso, se realiza La separación de la fase metanogénica de las fases de hidrólisis y acidificación ya que permite un manejo por aparte de los principales grupos microbianos involucrados de tal manera que facilita la operación del sistema y confiere una mayor estabilidad al proceso.
- **Ventajas:** “Si la primera etapa consiste en un reactor discontinuo, el líquido tratado en la segunda es el obtenido por percolación en la primera una vez recirculado el efluente de la segunda. Este sistema permite mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo, controlando la temperatura del efluente del segundo reactor”⁴⁸. La principal aplicación de este tipo de sistemas de biodigestión se encuentra en el aprovechamiento de residuos de frutas, verduras, ganado vacuno, entre otros.
- **Limitaciones:** El modo de funcionamiento está dado por un primer reactor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, debido a que es

⁴⁷ CAMPOS, Elena; ELÍAS CASTELLS, Xavier y FLOTATS, Xavier. Op.cit.,p. 1255

⁴⁸ Ibid., p. 1255.

el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos. Después pasa a un segundo reactor en el cual se tiene un de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. En cuanto a las condiciones de operación son más fáciles de controlar a comparación de un proceso mono etapa, debido a que se puede realizar un seguimiento más detallado en cada fase, este parámetro permite llevar a cabo el proceso eficientemente.

1.7 BIOGÁS

La producción de biogás por descomposición anaerobia es una forma útil para tratar residuos biodegradables ya que producen combustible de valor, además de generar un efluente que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono.

Tabla 3 Energía equivalente (Valor energético) Biogás Vs otras fuentes

Valores	Biogás*	Gas Natural	Gas Propano	Gas Metano	Hidrog.
Valor Calorífico (Kwh/ m ³)	7.0	10	26	10	3
Densidad (t/m ³)	1.08	0.7	2.01	0.72	0.09
Densidad con respecto al aire	0.81	0.54	1.51	0.55	0.07
Limite de explosión (% de gas en el aire)	6-12	5-15	2-10	5-15	4-80
Temperatura de encendido	687	650	470	650	585
Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s)	0.31	0.39	0.42	0.47	0.43
Requerimiento teórico de aire (m ³ /m ³)	6.6	9.5	23.9	9.5	2.4

Fuente. Programa de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura, Global Environment Facility, 2001⁴⁹.

El biogás tiene variedad de aplicaciones en la industria y puede ser utilizado fácilmente en todas las aplicaciones diseñadas para el gas natural, tales como “combustión directa incluyendo calefacción-absorción y calefacción-refrigeración, cocción, secado, y en las turbinas de gas. También puede utilizarse como carburante en los motores de combustión interna y celdas de combustible para la producción de trabajo mecánico y/o electricidad”⁵⁰.

⁴⁹Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Manual De Biogás. Op.cit.,p 55

⁵⁰ GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto, et al. BIOGAS. Op.cit.,p.15

2. METODOLOGIA

El proyecto se dividió en 4 pasos, los cuales son la caracterización de los residuos disponibles en la central de abastos de Bogotá, seguido a esto el diagnóstico y montaje de los equipos dispuestos por la empresa unión temporal residuos verdes, siendo esta la encargada del manejo y disposición de los residuos, luego la selección de las mezclas con la formulación de sustratos a partir de referencias bibliográficas, el control y monitoreo del proceso y por último el análisis y selección de la mezcla con mejores resultados en la obtención del biogás y un análisis estadístico.

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS VEGETALES

Para caracterizar los residuos vegetales que se implementaran, primero se evalúa la estabilidad física de los alimentos que ingresan a la central de abastos como residuos, permaneciendo constantes a lo largo del año. En la central de abastos diariamente los alimentos agrícolas son expuestos a malas prácticas, dentro de las cuales se encuentran:

- No se realiza una estandarización del producto, de manera que se combinan diferentes tamaños, estados de maduración especialmente de frutas.
- Los empaques no son los más adecuados, ya que no protegen favorablemente los productos y en el momento del empaque se maltratan al ser presionados para introducir una mayor cantidad.
- El cargue se realiza de forma manual, en donde es un proceso apresurado o brusco y en el descargue generalmente se tiran, causando maltrato en los productos.
- En el momento del transporte por la implementación de empaques inadecuados y la falta de estandarización del apilado, la carga queda en mala ubicación y esto acompañado por la movilización por carreteras sin pavimentar produce movimientos que causan roces en la carga y ocasionan daños mecánicos en los productos.

Estas situaciones producen daños en los alimentos, llegando como residuos vegetales sin una correcta estandarización, presentando daños parciales o totales.

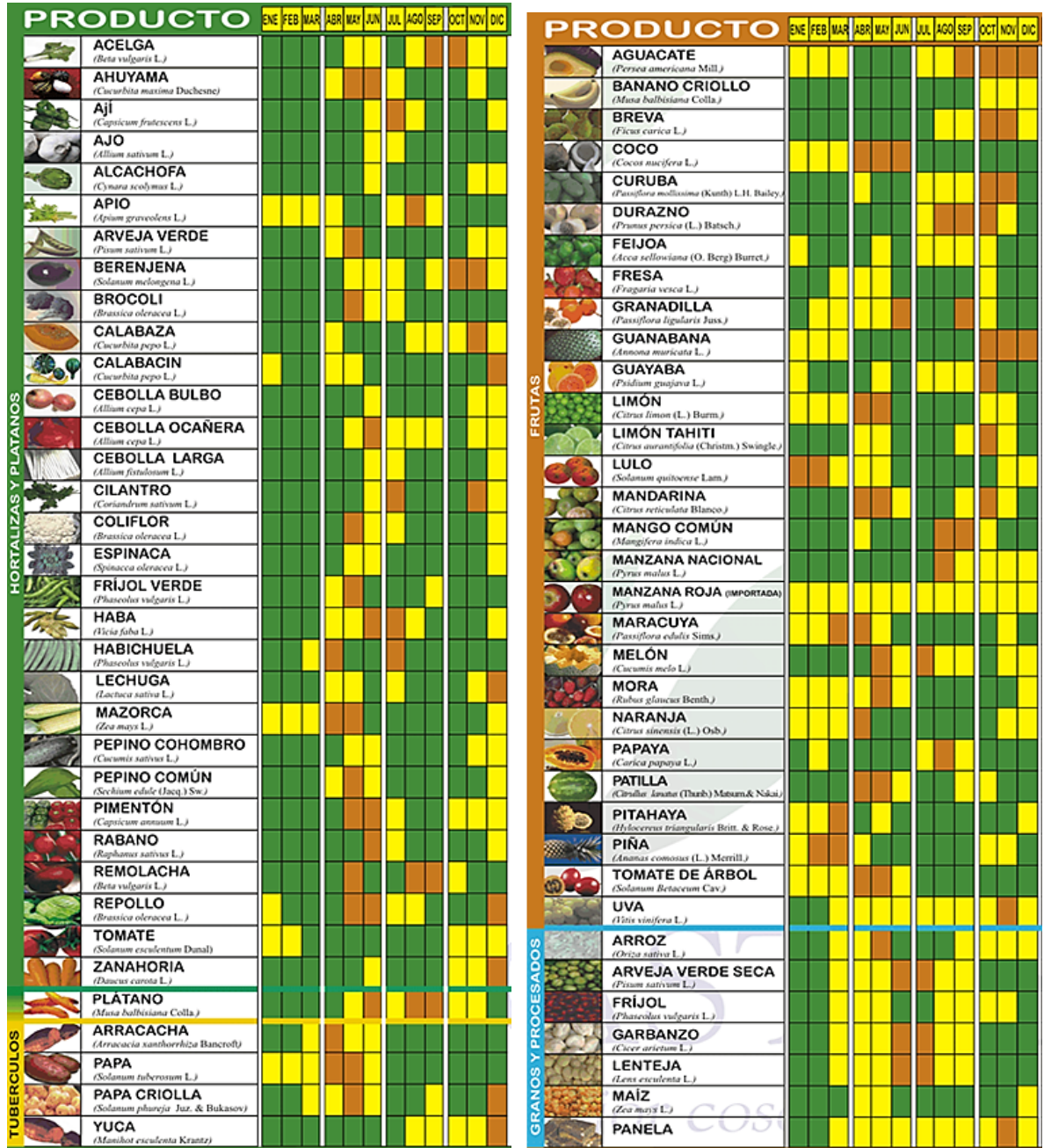
a la Central llegan desde los centros de producción un alto volumen de alimentos que no son comercializados convirtiéndose en material vegetal desechado principalmente porque durante el cargue, empaque y transporte no se protegen de forma adecuada, ocasionando pérdida de la vida útil⁵¹.

2.1.1 Evaluación de la estabilidad física a lo largo del año de los residuos.

Para esta evaluación se tuvo en cuenta las cosechas de frutas y vegetales durante cada mes del año, identificando la oferta de cada uno de los productos vegetales (ver **Figura 4**), también se analizan las estadísticas anteriormente presentadas de los residuos que ingresan mensualmente a la central de abastos (ver **Tabla 2.**), y mediante referencias bibliográficas se identifican los residuos con mayor porcentaje de macronutrientes y micronutrientes. De acuerdo a estos cuatro factores, se realiza una matriz de selección para determinar los residuos que se implementaran en el proceso de digestión anaerobia.

⁵¹ Unión temporal Residuos Verdes. Op.cit., p

Figura 4. Oferta de productos vegetales



Fuente. Corporación de Abastos S.A. Plan Estratégico De Manejo Integral De Residuos Sólidos⁵².

⁵² Corporación de Abastos S.A. Plan Estratégico De Manejo Integral De Residuos Sólidos. Disponible en: <http://www.corabastos.com.co/sitio/index.php>

En donde el color verde significa un oferta alta, el color amarillo una oferta media y el naranja una oferta baja.

2.1.2 Composición de macronutrientes y micronutrientes. En la composición nutricional se evalúan los porcentajes de proteínas, grasas y azúcares, para esto se realiza un análisis bibliográfico que incluye cuantificar en la muestra el %C, %P, y %N entre otros de estos residuos. Para este análisis se recurrió a las bases de datos de la FAO y los métodos de muestreo según (H et al. 2003)⁵³, junto con las tablas de (PEÑA MARTÍN 2003)⁵⁴ que tiene datos actualizados al 2015 y de acuerdo a esto se seleccionaron las frutas y verduras con mayor porcentaje de macronutrientes y micronutrientes, estos residuos fueron la espinaca, remolacha, tomate, apio, calabaza, uva, sandia, piña, melón y mango, luego se realiza una matriz de selección.

La composición y propiedades físicas de los residuos orgánicos son las siguientes y están en base al aporte nutricional por cada 100g de porción comestible (ver **Tabla 4** y **Tabla 5**).

Tabla 4. Composición nutricional verduras seleccionados

Residuo	Espinaca	Remolacha	Tomate	Apio	Calabaza
Agua	91.4%	89%	94%	95%	96%
Hidratos de carbono	2,6%	6,5%	4.6%	1,1%	2,5%
Proteínas	0,2%	0.4%	0.8%	0,3%	1%
Lípidos	0.3%	0.1%	0.3%	0, 2%	0,2%
Potasio	500 mg	392 mg	258 mg	300 mg	300 mg
Sodio	60 mg	73 mg	3 mg	120 mg	3 mg
Calcio	90 mg	23 mg	10 mg	55 mg	24 mg
Hierro	4 mg		0, 6 mg	1 mg	
Fosforo	45 mg	41 mg	24 mg	39 mg	28 mg
Vitamina A	1 mg		207 mg	0,7 mg	90 mg
Vitamina C	30 mg	10 mg	26 mg	7 mg	22 mg
pH	5.5-6.8	4.9-5.6	4	5,7-6,0	6

Fuente. H, Greenfield y D.A.T, Southgate. Datos De Composición De Alimentos. FAO, 2003⁵⁵.

⁵³ H, Greenfield y D.A.T, Southgate. Datos De Composición De Alimentos. FAO ed. Sidney, Australia: Elsevier Science Publishers, 2003. p. 321978-92-5-304949-3

⁵⁴ PEÑA MARTÍN, Gonzalo. Tabla de composición de alimentos, 2015.

⁵⁵ H, Greenfield y D.A.T, Southgate. Datos De Composición De Alimentos. FAO, 2003. Op.cit.,p

Tabla 5. Composición nutricional frutas seleccionados

Residuo	Uva	Sandía	Piña	Melón	Mango
Agua	96%	92%	83.6%	91%	84.40%
Hidratos de carbono	16%	7,5%	26%	13%	14.10 g
Proteínas	0,6%	0.61%	0,8%	0,5%	0,8%
Lípidos	0.10g	0.20g	0.40-1.30 g	0,2g	0.20 g
Potasio	192mg	158 mg	108mg	267mg	115mg
Sodio	1.90mg	0,500 mg	13.00 mg	9mg	2.00 mg
Calcio	9.90 mg	10 mg	23mg	12mg	9.00 mg
Fosforo	12.8mg	5.00 mg	3mg	12mg	10.40 mg
Vitamina A	100 IU	569 IU	58 IU	3,382%	1,082 IU
Vitamina C	4mg	8,1mg	47,8mg	36,7mg	36,4mg
pH	2.9	5.2	3.2	6,3	3.9 -4.6

Fuente. H, Greenfield y D.A.T, Southgate. Datos De Composición De Alimentos. FAO, 2003⁵⁶.

2.1.2.1 Matriz de selección. Luego de la evaluación de los residuos con alto contenido de macronutrientes los cuales se muestran en la **Tabla 4** y **Tabla 5** se realizó la matriz de selección dando un puntaje seleccionado de acuerdo al grado de importancia de los siguientes factores: la disponibilidad del residuo a lo largo del año, las propiedades nutricionales anteriormente presentadas, el tratamiento que requiere el residuo para lograr una mezcla homogeneizada, y la competencia que pueda presentar cada residuo implementado en otros proyectos similares.

Para cada matriz los porcentajes seleccionados fueron los siguientes: para la disponibilidad del residuo se determinó un 35% y de esta manera asegurar que durante todo el año este residuo estará presente y podrá ser aprovechado en cualquier temporada del año, para las propiedades de macro y micronutrientes un 40%, siendo este el porcentaje más alto debido a la importancia de estos nutrientes para los microorganismos, en cuanto al tratamiento que requiere el residuo se le dio un valor del 15% y por ultimo para la competencia un 10%.

De acuerdo a esta selección se realizaran tres corridas, divididas en tres mezclas; una de ellas será la de control del proceso la cual está compuesta solo por estiércol vacuno y agua, la segunda estará compuesta por una mezcla de frutas y por último la tercera mezcla compuesta por verduras. Esto se realiza con el fin de determinar que mezcla de residuos genera una mayor cantidad de metano en el

⁵⁶ H, Greenfield y D.A.T, Southgate. Datos De Composición De Alimentos. FAO ed. Sidney, Australia: Elsevier Science Publishers. Op.cit.,p

proceso y de acuerdo a esto cual es la mejor para el tratamiento por digestión anaerobia.

2.1.3 Evaluación de la composición fisicoquímica. Esta composición es un aspecto importante a considerar al momento de seleccionar los residuos para su aprovechamiento mediante un proceso determinado, en este caso digestión anaerobia. Por lo tanto, las principales propiedades que se tienen en cuenta son la humedad, el pH, y la temperatura, ya que el proceso de conversión energética de la biomasa se ve afectado por estas variables⁵⁷. También influye la calidad del residuo debido a que en términos del rendimiento del biogás dependerá en parte de la frescura del residuo, a mayor frescura, mayor será el rendimiento del biogás y tendrá menor peligro de acidificarse el proceso.

La manera en la cual se evaluaron estos parámetros se describe a continuación:

2.1.3.1 Humedad. Para la determinación de la humedad al inicio del proceso se utilizó un método empírico denominado la prueba de puño⁵⁸, este método consiste en exprimir una cantidad del material en la palma de la mano y de acuerdo a los siguientes parámetros determinar un porcentaje de humedad aproximado. Si sale un hilo de agua continuo del material, la humedad será > 40%, si no se produce un hilo continuo de agua y el material gotea intermitentemente entonces estará cercano al 40%, Si el material no gotea y cuando se abre el puño de la mano permanece moldeado la humedad estará entre un rango de 20 a 30% y si se abre el puño y el material se desintegra será < 20%⁵⁹.



2.1.3.2 pH y Temperatura. Para la evaluación y control del pH en el sistema se instaló en cada digestor un pH metro y termómetro digital, sus especificaciones técnicas se muestran en el **Cuadro 1**, y se reportaran datos cada dos días durante todo el proceso, para observar el cambio del mismo y tener un control en cada etapa del proceso.

⁵⁷ ESCALANTE HERNANDEZ, Humberto, et al. Atlas Del Potencial Energético De La Biomasa Residual En Colombia. Op.cit.,p. 135,136

⁵⁸ AVENDAÑO ROJAS, Daniella. El Proceso De Compostaje. Chile.: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2003.

⁵⁹ Ibid., p10

Cuadro 1. Especificaciones técnicas de los equipos de medición implementados.

Equipo de Medición	Especificaciones Técnicas
	<p>Rango de pH: 3,5 – 9 pH Rango de temperatura: -9 a 50 °C Longitud de sonda: 200mm</p>
	<p>400mm de longitud Termómetro para compost Rango: de -10 a 90°C</p>

2.2 DIAGNÓSTICO DE EQUIPOS

Para la adecuación del sistema de digestión anaerobia primero se realizó un diagnóstico de los equipos con los que cuenta, en este caso solo están presente los tanques en fibra de vidrio y las motobombas los cuales pertenecen y son proporcionados por la empresa Unión Temporal Residuos Verdes. Seguido a esto se evaluaron las condiciones ambientales del lugar donde estará presente el sistema el cual será en la finca La Esperanza en el municipio de Sibaté, garantizando un entorno confiable para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia.

Inicialmente se cuenta con tres tanques de fibra de vidrio como se puede observar en la **Ilustración 1**, los cuales se utilizarán como digestores y asemejarán cada etapa del proceso. Las características de los tanques se pueden ver en la **Tabla 6**.

Ilustración 1. Tanques externos.



Tabla 6. Características del tanque externo.

Parámetro	Características
Altura	190 cm
Volumen	3000 L

Dentro de cada tanque hay uno más pequeño como se puede observar la **Ilustración 2**, en el cual se encuentra almacenada la materia orgánica, las dimensiones y características de esos digestores se contemplan en la **Tabla 7**.

Ilustración 2. Tanques internos



Tabla 7. Características del tanque interno.

Parámetro	Características
Altura	80 cm
Volumen	120 L

También se cuenta con tres motobombas centrífugas monofásicas como se muestra en la **Ilustración 3**, las cuales se utilizarán para el paso de la materia orgánica entre los biodigestores y para realizar la recirculación de la biomasa en la fase hidrolítica.

Ilustración 3. Bomba centrífuga



Estas motobombas son de marca Siemens, en la **Tabla 8** se presentan las características técnicas de operación.

Tabla 8. Características técnicas de la bomba centrífuga.

Parámetro	Valor
Voltaje	220 voltios
Corriente	21,6/11,0 Amperios
Flujo máximo	595 L/min
Altura máxima	24 metros
Succión y descarga	5.08cm (2")

También se cuenta con un agitador el cual se puede observar en la **Ilustración 4.**

Ilustración 4. Agitador monofásico



Este agitador tiene un motor monofásico con aspas, el cual se utiliza al inicio del proceso para mezclar los residuos, agua y estiércol. Posteriormente se realizará la alimentación de la mezcla homogeneizada obtenida al biodigestor, con ayuda de una de las motobombas antes descritas.

Teniendo en cuenta las características y estado de los equipos anteriormente mencionados se realiza un inventario para determinar los equipos que hacen falta

y las conexiones que se adecuaran a cada tanque para dejar el sistema completamente anaerobio, adecuado para el paso de la materia orgánica de una fase a la siguiente, con control de temperatura y pH, y la salida del gas.

2.3 FORMULACIÓN DE SUSTRATOS

La elección y formulación de sustratos es importante para la obtención de una planta de calidad y para que ocurra el proceso, por lo cual para una correcta formulación de la materia orgánica que se va a ingresar al digestor, se determinará primero las proporciones de cada residuo seleccionado por la matriz mencionada anteriormente, y de acuerdo a las relaciones carbono/nitrógeno requeridas, para el crecimiento de los microorganismos y un correcto desarrollo del proceso, la relación C/N para el estiércol vacuno se determinaron mediante referentes bibliográficos, como se muestra en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Relación C/N de residuos animales

Residuos animales	%C	%N	C/N
BOVINOS	30	1,3	25:1
EQUINOS	40	0,8	50:1
OVINOS	35	1	35:1
PORCINOS	25	1,5	16:1
CAPRINOS	40	1	40:1
CONEJOS	35	1,5	23:1
GALLINAS	35	1,5	23:1
PATOS	38	0,8	47:1
PAVOS	35	0,7	50:1
EXCRETAS HUMANAS	2,5	0,85	3:1

Fuente Programa de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura, Global Environment Facility, 2001⁶⁰.

De manera teórica se efectuará una estimación de la relación C/N para cada mezcla aplicando la siguiente formula⁶¹:

⁶⁰ Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility.Op.cit.,p

⁶¹ Ibid.,p 35.

**Ecuación 1. Relación
Carbono/Nitrógeno**

$$C/N: \frac{C1 * Q1 + C2 * Q2 + \dots Cn * Qn}{N1 * Q1 + N2 * Q2 + \dots Nn * Qn}$$

Donde.

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

La cantidad de residuos que se implementarán dependen del volumen de la cámara del digestor, sin embargo, solo se utilizará el 75%, debido a la generación de distintos gases obtenidos de las fases presentes en el proceso de biodigestión tales como CO₂, H₂ y CH₄ entre otros.

2.4 DETERMINACIÓN DE LA POBLACIÓN MICROBIANA EN LA FASE HIDROLÍTICA

Se toma un muestreo en la fase hidrolítica de las mezclas de residuos de frutas y de verduras al transcurrir dos semanas de ingreso de la materia orgánica a la cámara del digestor. Estas muestras se analizaron en los laboratorios de microbiología de la Universidad Javeriana, para estos análisis se lleva a cabo una siembra de microorganismos, la cual se lleva a cabo con instrumentos estériles, siendo necesario destruir todos aquellos microorganismos que pudieran encontrarse en el medio y en los instrumentos de trabajo, esta esterilización se lleva a cabo mediante calor directo.

Para la realización de la siembra se tomaron 10 g de la muestra obtenida de cada mezcla, las cuales se diluyeron con agua peptonada al 1%, y se realizaron 5 diluciones consecutivas en base 10, para calcular la concentración de microorganismos presentes en las mezclas, después de las diluciones de las muestras se retiraron 0.1 mL y se extendieron en la superficie del medio de cultivo sólido.

2.4.1 Evaluación microbiológica. Para la evaluación microbiológica se prepararon diferentes medios de cultivo para hacer recuento en placa en cajas de 90 mm, luego se incuban a 37°C hasta presentar un crecimiento bacteriano (colonias), y seguido a esto se evalúa la actividad enzimática para cada mezcla

identificando la presencia de microorganismos celulíticos, amilolíticos, lipolíticos, proteolíticos y lignocelulíticos.

2.4.2 Actividad enzimática. Se realizaron medios de cultivo con tributirina, celulosa, almidón, lignina y leche Agar, este último es un medio que se implementa para observar la hidrólisis de la caseína que se da por medio de la enzima proteasa, la cual es excretada al medio para la degradación de proteínas, obteniendo aminoácidos. En cuanto al medio de cultivo con agar celulosa, se utiliza para la identificación de microorganismos celulíticos, ya que la celulosa es el polisacárido más abundante en los residuos que se degradaron, este mecanismo de hidrólisis enzimática se lleva a cabo mediante la acción de la enzima celulasa que actúa sinérgicamente para la degradación de la celulosa, mediante la mezcla de varios componentes enzimáticos que producen la ruptura del enlace β - 1,4 glucosídicos.

La tributirina es un medio que se utiliza para la identificación de microorganismos lipolíticos, este sustrato permite analizar la actividad de las lipasas, debido a que estas enzimas son capaces de hidrolizar ésteres de glicerol de distinto largo de cadena.

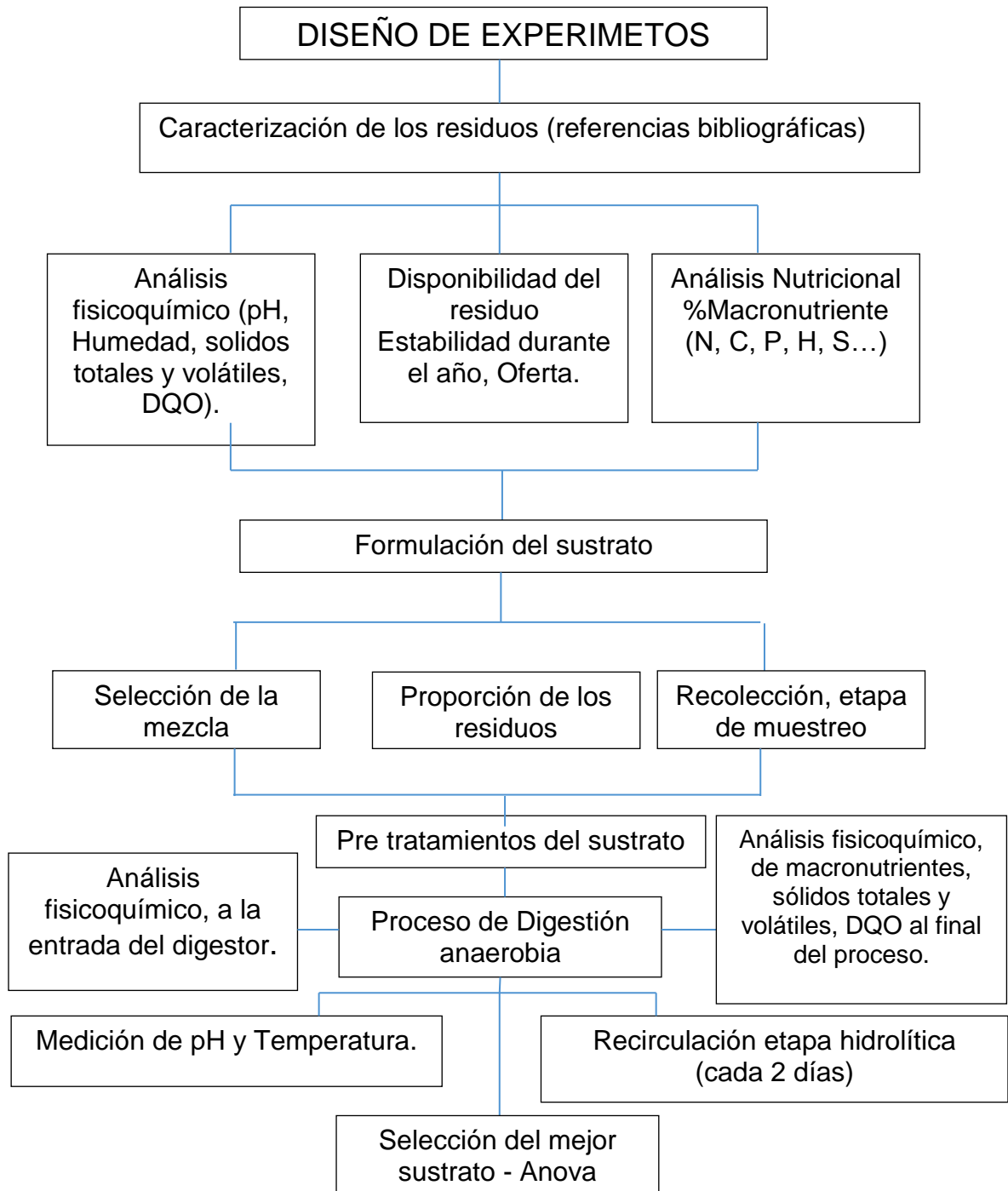
En el agar almidón, la actividad amilolítica es llevada a cabo por dos enzimas las cuales son las encargadas de hidrolizar el almidón. Por una parte, está la α amilasa, la cual es la encargada de hidrolizar cadenas lineales y ramificadas, rompiendo enlaces 1,4 interiores (endoamilasa) para formar una mezcla de dextrinas. En cuanto a la β amilasa es la encargada de romper unidades 1,4, generando maltosa. Sobre la amilopectina actúa en las uniones alfa-1,4 de la cadena recta, y detiene su acción a distancia de 2 unidades de glucosa antes de atacar las uniones alfa-1,6.

Y por último los medios de cultivo en lignina, su degradación es llevada a cabo por microorganismos en presencia de oxígeno y glucosa, está ubicada en la pared celular y es el componente de las plantas que se degrada más lentamente, principalmente debido a su estructura amorfa muy compleja.

2.5 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Para el proceso se realizó un diseño de experimentos en el cual se puede observar la metodología empleada en el **Diagrama 1**.

Diagrama 1. Diseño de experimentos



Primero se llevan a cabo los pretratamientos de reducción de partícula, para luego un mezclado y homogenizado del material orgánico, seguido a esto se carga el digester con la mezcla ya pesada y evaluados los factores como humedad, pH y temperatura de entrada y luego un comportamiento de estos factores durante todo el proceso.

2.5.1 Comportamiento del pH. Antes de alimentar al digester la materia orgánica se evalúa el pH y se realiza la prueba de humedad, la cual debe presentar un valor entre 80 a 90%, Durante el proceso de digestión anaerobia se llevó a cabo un monitoreo de dos días de por medio registrando datos de pH (Ver **ANEXO A**), mediante pH metros fijos durante el tiempo de retención.

2.5.2 Comportamiento de la temperatura. Para el monitoreo de la temperatura se implementó un termómetro fijo en ambas fases para evitar que se disipe el calor interno y garantizar unos datos más confiables. Estos datos están registrados cada dos días y se muestran en el **ANEXO B**.

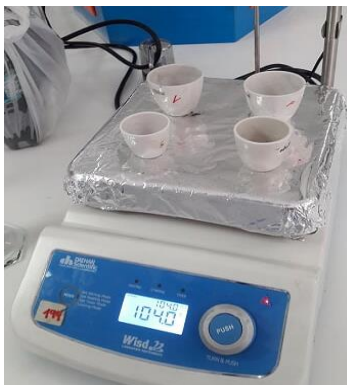
2.5.3 Determinación de parámetros fisicoquímicos a la salida del proceso. Los análisis de sólidos volátiles y totales, así como de la demanda química de oxígeno fueron realizados en los laboratorios de tecno parque y la metodología aplicada se muestra en el

2.5.4 ANEXO CC, estos análisis están dispuestos en la norma técnica colombiana NTC 5167 (productos agrícolas: productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes), donde especifican los requisitos que deben cumplir estos análisis, y los ensayos a los cuales deben ser sometidos. Los análisis principales para determinar el tipo de producto obtenido y su relación con la producción de biogás son los siguientes:

2.5.4.1 Sólidos totales y volátiles. El contenido de sólidos totales presentes en el material orgánico, son los residuos resultantes después de la evaporación y secado de la muestra, y esta determinación permite estimar el contenido de materia disuelta presente en el efluente. Las muestras se tomaron al finalizar el proceso para evaluar la calidad del efluente y su relación con la producción de metano, para esto se recolecta una muestra de cada mezcla en frascos plásticos y se refrigeran inmediatamente.

La evaporación de la muestra se realizó mediante una estufa con control de temperatura, como se muestra en la **Ilustración 5**.

Ilustración 5. Estufa.



En cuanto a los sólidos volátiles, son sólidos orgánicos que se volatilizan cuando se calcinan a una temperatura entre 550 y 600°C en un tiempo estimado, para la determinación de este factor se utiliza el método gravimétrico y se rigen por la norma NTC 897.

La calcinación se realiza en una Mufla, como se muestra en la **Ilustración 6**.

Ilustración 6. Incineración en Mufla



2.5.4.2 Demanda Química de Oxígeno. La DQO es una medida indirecta del contenido de materia orgánica y compuestos oxidables en una muestra, mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay suspendidos en una muestra líquida y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO_2/L). se realiza mediante un reflujo cerrado (Ver **Anexo C**) basado en la norma NTC 3629.

Este análisis se realizó mediante un espectrofotómetro o colorímetro con una longitud de onda de 600 nanómetros (Ver **Ilustración 7**).

Ilustración 7. Espectrofotómetro.



Los registros fotográficos del proceso de los análisis realizados se muestran en el **ANEXO D**, al igual que los cálculos respectivos.

2.5.5 Cromatografía de gases. Al finalizar el proceso de digestión anaerobia se realiza un análisis para la caracterización de mezclas complejas de gases, midiendo la concentración de metano y dióxido de carbono presentes en el biogás. Este análisis se desarrolla inyectando la muestra directamente al cromatógrafo, el cual muestra el contenido de cada uno de los gases presentes en función del tiempo en que tarda cada gas en hacer el recorrido a través del equipo, teniendo tres repeticiones por cada muestra y al final se realizó un promedio para cada una, de esta manera disminuyendo el error. Esta cromatografía fue realizada en los laboratorios de la Universidad Nacional, para el biogás generado por cada mezcla formulada y la mezcla control, los resultados se encuentran en el **ANEXO E**.

2.5.6 Diseño de experimentos. Para determinar cuál de las mezclas seleccionadas es la mejor, se realiza un diseño de bloques completamente aleatorizado.

Para este diseño se requiere identificar las variables que están involucradas en el proceso:

1. Definir la variable respuesta.
2. Se identifican las variables que influyen en esa variable respuesta, las cuales son el pH, la temperatura, y la demanda química de oxígeno, sin embargo, esta última influye en la entrada y salida del proceso, pero no

durante el tiempo de permanencia de la biomasa en el digestor, por lo tanto no se tomara como variable controlable. Se tomará el pH, que más adelante en el siguiente capítulo se mostrará de manera más detallada.

3. Realización del diseño, en donde se plantean las hipótesis y se realiza la tabla Anova, se calcula F y compara con el de las tablas con un nivel de significancia de 0,05.
4. Análisis de datos, se realiza un modelo matemático lineal. (ver **ANEXO F**)

3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS VEGETALES

Debido a que las excretas de animales son ricas en nitrógeno con una relación inferior a 25:1 significa que durante la fermentación tendrá mejor velocidad de degradación y producción de gas, en cuanto a los residuos agrícolas los cuales son ricos en carbono con una relación superior a 30:1 producen más gas que las ricas en nitrógeno sin embargo la generación es más lenta, por esto con el fin de conseguir un buen rendimiento de producción de gas en forma constante es necesario combinar proporciones adecuadas en relación al contenido de nitrógeno y carbono.

3.1.1 Matriz de selección. Durante la selección de la primera matriz para la mezcla de frutas se tomaron los siguientes residuos: 1. Espinaca; 2. Apio; 3. Tomate; 4. Remolacha; 5. Calabaza; 6. Coliflor. (Ver **Tabla 10**)

Tabla 10. Matriz de selección de sustratos residuos verduras

Residuos	Disponibilidad del residuo (35%)	Propiedades nutricionales y fisicoquímicas (40%)	Tratamiento que requiere el residuo (15%)	Competencia (10%)	Total
1	$35 \times 4 = 140$	$40 \times 4 = 160$	$15 \times 4 = 60$	$-10 \times 1 = -10$	350
2	$35 \times 4 = 140$	$40 \times 3 = 120$	$15 \times 4 = 60$	$-10 \times 1 = -10$	310
3	$35 \times 4 = 140$	$40 \times 3 = 120$	$15 \times 4 = 60$	$-10 \times 2 = -20$	310
4	$35 \times 3 = 105$	$40 \times 4 = 160$	$15 \times 3 = 45$	$-10 \times 2 = -20$	290
5	$35 \times 3 = 105$	$40 \times 4 = 160$	$15 \times 2 = 30$	$-10 \times 1 = -10$	285
6	$35 \times 2 = 70$	$40 \times 3 = 160$	$15 \times 3 = 45$	$-10 \times 1 = -10$	265

Con los criterios mencionados anteriormente se obtuvo que para la mezcla de los vegetales los residuos a implementar son: espinaca, apio, tomate, y remolacha.

La selección de la calabaza para la mezcla de vegetales, presenta una dificultad en el proceso de triturado, debido a que contiene muchas semillas en su interior y a su vez la irregularidad (nivel de descomposición alto) en la cual se encuentra como residuo.

En cuanto a su disponibilidad es muy baja a lo largo del año al igual que la coliflor. En la selección de la segunda matriz se tomaron: 1. Uva; 2. Melón; 3. Sandía; 4. Piña; 5. Mango; 6. Papaya. (Ver **Tabla 11**).

Tabla 11. Matriz de selección de sustratos residuos frutas

Residuos	Disponibilidad del residuo (35%)	Propiedades nutricionales y fisicoquímicas (40%)	Tratamiento que requiere el residuo (15%)	Competencia (10%)	Total
1	$35*4=140$	$40*4=160$	$15*4=60$	$-10*2=-20$	340
2	$35*4=140$	$40*4=160$	$15*3=45$	$-10*1=-10$	345
3	$35*4=140$	$40*3=120$	$15*3=45$	$-10*1=-10$	295
4	$35*3=105$	$40*4=160$	$15*3=45$	$-10*1=-10$	300
5	$35*3=105$	$40*4=160$	$15*1=15$	$-10*1=-10$	285
6	$35*2=70$	$40*3=160$	$15*3=45$	$-10*1=-10$	265

En la selección de frutas como sustrato se obtuvo como resultado: uva, melón, sandía, y piña. Aunque el mango presenta una composición nutricional y fisicoquímica adecuada para dicha mezcla presenta una desventaja la cual es que en su interior presenta una semilla, dificultando el proceso de trituración. Es por esto que la calificación en “tratamiento que requiere el residuo” fue baja. En cuanto a la papaya presentaba una viabilidad en la mayoría de los criterios tenidos en cuenta, pero este residuo está en bajas proporciones a lo largo del año según las estadísticas presentadas.

3.2 MONTAJE DEL SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

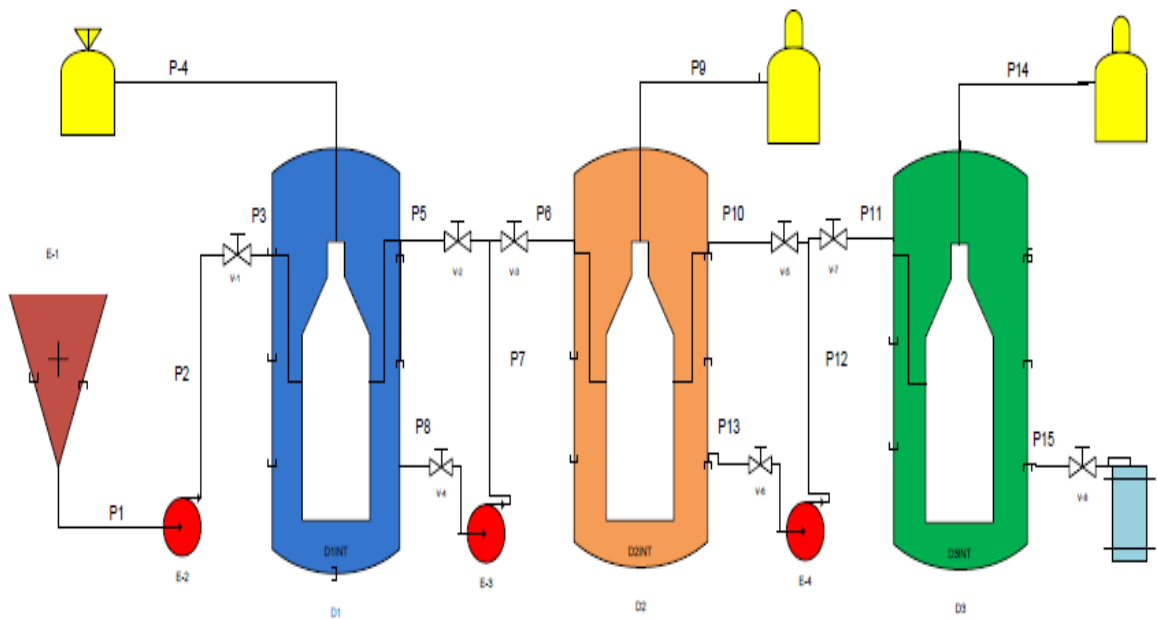
La adecuación de los tanques se realizó en las instalaciones de Corabastos, mientras que el montaje del mismo se realizó en la finca La Esperanza en Sibaté en donde está presente y en funcionamiento el sistema.

De acuerdo al diagnóstico previo de los equipos estos se encontraron en buenas condiciones. Los tanques exteriores no presentaban ningún tipo de ruptura, por otro lado las motobombas no presentaron ningún tipo de corrosión, sin embargo se le realizó un mantenimiento al motor llamado embobinado para asegurar un buen funcionamiento. Lo único que se tuvo en consideración fueron las tuberías

que permiten las conexiones tanto de los tanques internos como externos, puesto que presentaron rupturas en su mayoría.

Para mostrar una descripción más clara del proceso se realizó un diagrama del proceso que ilustra las etapas de hidrólisis y metanogénesis, las conexiones entre los digestores tanto externos como internos con las válvulas de paso respectivas, la recolección de los gases generados tales como CO_2 , metano, H_2 entre otros, y el funcionamiento de las motobombas. (Ver **Diagrama 2**)

Diagrama 2. Proceso de digestión anaerobia por etapas



Se realizó la conexión exterior con tubería PVC de 2 pulgadas de diámetro a presión y con válvulas de bola para el momento de realizar la recirculación y el paso de una fase a otra como se puede observar en la **Ilustración 8**.

Durante el proceso de digestión anaerobia se llevó a cabo un monitoreo de cada 2 días, registrando datos de temperatura y pH, siendo este medido mediante un sistema de muestreo a la salida de cada tanque (**Ilustración 9**). Durante la fase aerobia y en la fase anaerobia estando permanentes en el digestor, en cuanto a la temperatura se implementó un termómetro fijo en ambas fases para evitar que se disipe el calor interno y garantizar unos datos más confiables.

Ilustración 8. Conexión exterior



El proceso también cuenta con un sistema en la parte inferior entre la bomba y el digestor, en el cual se encuentra una válvula de bola de dos pulgadas de diámetro que regula el caudal que va dirigido hacia la bomba. Los dos codos de dos pulgadas direccionan el caudal procedente del tanque interno, llevándolo hacia la válvula de bola anteriormente descrita. En cuanto al sistema de muestreo el cual está ubicado después de los codos, se implementó un buje con reducción de dos a media pulgada, seguido por un registro de media pulgada. Se decidió esta medida para obtener volúmenes más pequeños, evitando pérdidas significativas de la biomasa presente ver (**Ilustración 9**)

Ilustración 9. Toma de muestreo



En cuanto a la conexión interna la tubería es de 1½ pulgada de diámetro como se puede observar en la **Ilustración 10**, esta medida es menor a la tubería exterior debido a que el volumen de la biomasa presente en el tanque interior es baja en

consideración al volumen del tanque exterior, esta tubería de menor diámetro garantiza una entrada con mayor potencia del caudal al tanque.

Ilustración 10. Conexión interna

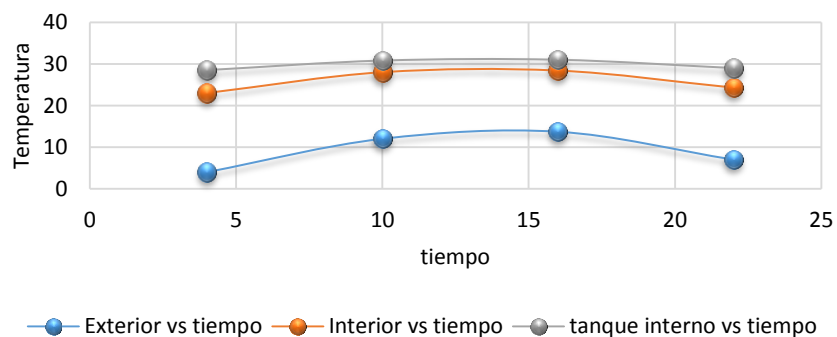


Teniendo el sistema totalmente adecuado se evaluaron las temperaturas ambientales antes del ingreso del material orgánico en el exterior e interior del lugar, así como dentro de los digestores de fibra de vidrio durante dos semanas cada 6 horas y el promedio de estas temperaturas se puede observar en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Promedio de control de temperatura ambiental

Temperatura (°C)			
tiempo (h)	Exterior	Interior	Tanque interno
4	4	23	28,5
10	12	28	30,8
16	13,7	28,4	31
22	7	24,3	29

Grafica 3. Comparación control de temperatura exterior, interior y dentro del digestor



De acuerdo estos datos registrados y como se puede observar en la **Grafica 3**, la temperatura mínima registrada en el exterior es de 4°C, dentro de interior del plástico que recubre los digestores es de 23°C, y en la cámara del digestor es de 28,5°C demostrando que la fibra de vidrio es un excelente aislante térmico, sin embargo para comprobarlo se realizará al final del proceso un análisis de transferencia de calor para evaluar las pérdidas al ambiente para mayor confiabilidad se utilizará poliuretano para recubrir los tanques internos y asegurar que la temperatura sea uniforme dentro del rango mesofílico para cada fase del proceso.

3.3 FORMULACIÓN DE LAS MEZCLAS

Para la fermentación los microorganismos metanogénicos necesitan nutrientes para producir biogás, por esta razón es necesario tener suficiente material de carga con el fin de que el proceso de biodigestión no se interrumpa.

Las mezclas de residuos orgánicos tienen la misma cantidad en peso de cada residuo seleccionado como se muestra en la **Tabla 13**. Para un total de 60 kg, ocupando el 75% de la cámara del digestor.

Tabla 13. Cantidad de residuos en kg

Fruta	cantidad (kg)	Vegetales	cantidad (kg)
Uva	5	espinaca	4
Sandía	6,5	apio	4
Melón	3,5	tomate	6
Piña	5	remolacha	6

De acuerdo a diversos autores, para determinar la relación entre los residuos y el contenido de agua y estiércol, se evalúa la importancia del contenido de agua en la mezcla; puesto que un contenido insuficiente de agua puede ocasionar que los microorganismos no se adapten al medio, causando baja eficiencia, es decir, bajas producciones de biogás. Por otra parte si la mezcla es muy diluida la materia orgánica degradada por los microorganismos será muy poca y la producción de biogás limitada, mientras que “si se usa principalmente estiércol y desechos de agricultura como alimento para el digestor, la razón de biomasa:agua debe estar

entre 1:1 y 1:2. Por consiguiente por cada 100 Kg. de heces y orina se requieren entre 100 y 200 litros de agua. Si el material de alimento consta principalmente de residuos vegetales, se requiere de más agua, en una razón de 1:3 o 1:4⁶².

Por lo tanto la proporción de los residuos con el estiércol se seleccionó en relación 1:3 y entre estiércol y agua como se menciona anteriormente en relación 1:2, para la mezcla de frutas y verduras se puede observar la cantidad de cada residuos en la **Tabla 13** y las proporciones para la mezcla de verduras se muestran en la **Tabla 14**, y para la mezcla de residuos de frutas en la **Tabla 15** , de esta manera obtener una mezcla completamente homogenizada con una humedad >50% y un relación C/N dentro del rango mencionado como se puede observar a continuación mediante un cálculo teórico, tomando como referencia la relación del estiércol vacuno (ver **Tabla 9**) y los contenidos en %C y %N de cada residuo, para las verduras (ver **Tabla 4**) y para las frutas (ver **Tabla 5**).

Tabla 14. Proporciones de la mezcla de verduras

Material orgánico	contenido (kg)
vegetales	20
estiércol	20
agua	20

Tabla 15. Proporciones de la mezcla de frutas

Material orgánico	contenido (kg)
Fruta	20
estiércol	25
Agua	15

⁶² HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, Horacio Aldo. Diseño De Un Biodigestor Instrumentado Electrónicamente Para La Generación De Biogás En Casa Habitación. México.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.

Las mezclas se determinaron de la siguiente manera:

Mezcla 1.

La formulación de esta mezcla contiene estiércol y agua residual, esta será la mezcla control del sistema de biodigestión como se puede observar en la **Ilustración 11.**

Ilustración 11 Muestreo Mezcla 1



Mezcla 2.

La formulación de esta mezcla está establecida por la presencia de agua residual, estiércol vacuno, vegetales y hortalizas como se muestra en la **Ilustración 12.**

Ilustración 12 Muestreo mezcla 2
(Residuos Verduras)



Mezcla 3.

La formulación de esta mezcla estará establecida por la presencia de agua residual, estiércol vacuno y frutas, como se muestra en la **(Ilustración 13.)**

Ilustración 13 Muestreo mezcla 3
(Residuos de Frutas)



La materia orgánica que se utiliza en el proceso se puede dividir en dos grupos: unas ricas en nitrógeno y otras ricas en carbono, debido a que los microorganismos consumen estos elementos en diferente proporción y son medidos en relación carbono/nitrógeno. Debido a que las excretas de animales son ricas en nitrógeno con una relación inferior a 25:1 significa que durante la fermentación tendrá mejor velocidad de degradación y producción de gas, en cuanto a los residuos agrícolas los cuales son ricos en carbono con una relación superior a 30:1 producen más gas que las ricas en nitrógeno, sin embargo la generación es más lenta, por esto con el fin de conseguir un buen rendimiento de producción de gas en forma constante es necesario combinar proporciones adecuadas en relación al contenido de nitrógeno y carbono.

Como se mencionó en la metodología la evaluación teórica de los residuos se determinó a partir de la **Ecuación 1**:

Relación C/N teórica para la mezcla de Verduras calculada a partir de la

$$C/N: \frac{2.6\% * 4 + 6.5\% * 6 + 3\% * 6 + 1.1\% * 4 + 25\% * 25}{0.2\% * 4 + 0.4\% * 6 + 0.8\% * 6 + 0.3\% * 4 + 1\% * 25} = 21,35$$

Relación C/N teórica para la mezcla de Frutas.

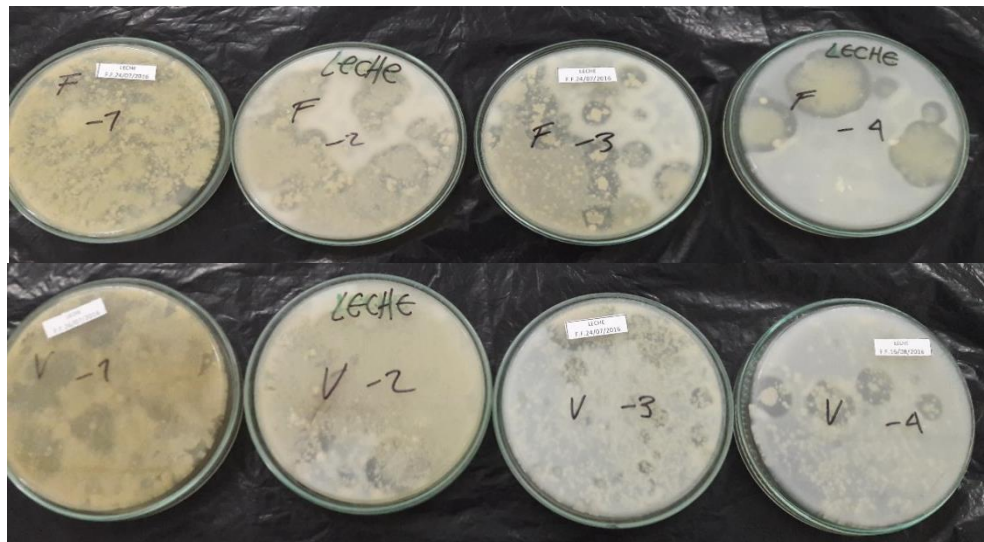
$$C/N: \frac{5 * 16\% + 6,5 * 7,5\% + 3,5 * 26\% + 5 * 13\% + 20 * 25\%}{5 * 0,6\% + 6,5 * 0,6\% + 3,5 * 0,8\% + 5 * 0,5\% + 20 * 1\%} = 24,37$$

De esta manera, de acuerdo a los datos tomados bibliográficamente se determinó una relación carbono/nitrógeno equilibrada y dentro del rango óptimo, asegurando un entorno adecuado para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos, debido a que con relaciones bajas de carbono/nitrógeno se emite amoníaco, y con relaciones altas el nitrógeno puede ser un nutriente limitante, de esta manera se tiene una relación C/N para la mezcla de vegetales de 21,35 y para la mezcla de frutas de 24,37, por lo tanto esto supone que durante el proceso de fermentación la velocidad de degradación de los microorganismos será alta, sin embargo esta velocidad también dependerá de la temperatura ambiente en la que se encuentren los digestores.

3.4 EVALUACIÓN MICROBIOLÓGICA DE LA POBLACIÓN MICROBIANA DENTRO DEL DIGESTORES (ETAPA HIDROLITICA)

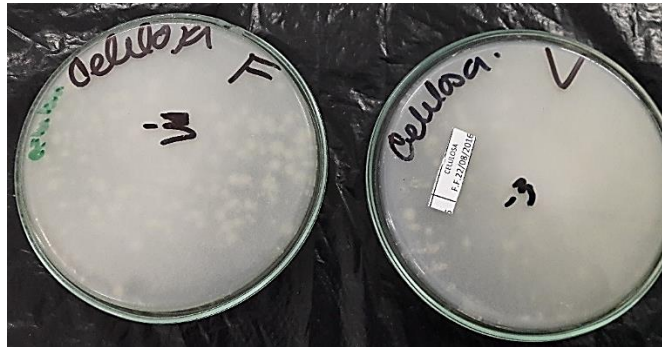
Se realizaron medios de cultivo con Leche Agar, evidenciando la proteólisis en los halos generados alrededor de las colonias (ver **Ilustración 14**). Esto es debido a que la enzima caseinasa cataliza a dicha proteína, los aminoácidos que se obtienen tienden a solubilizarse en el medio acuoso presente y genera el halo anteriormente descrito, presentando un color blanquecino opaco. En gran medida esto es favorable, puesto que la debida degradación de proteínas contribuye al porcentaje de nitrógeno, uno de los principales macronutrientes que implementa el microorganismo para su desarrollo, garantizando una buena actividad microbiológica durante esta fase.

Ilustración 14. Medios de cultivo (Leche)



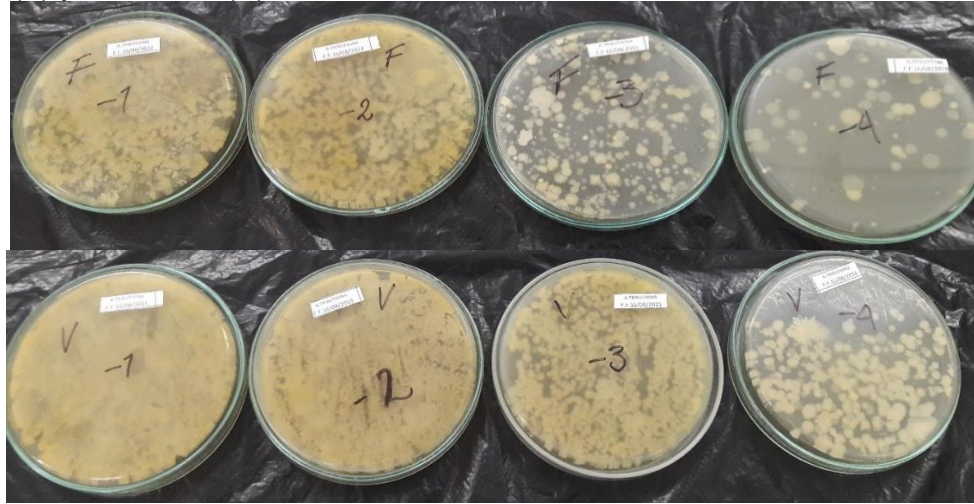
Este medio de cultivo se dejó encubando a 35°C durante 48 horas, como se logró demostrar las mezclas estudiadas tenían microorganismos celulíticos (ver **Ilustración 15**). Las diferentes enzimas que intervienen en la degradación de la celulosa antes descritas en la metodología se logran evidenciar por los halos de hidrolisis. Lo cual es relevante para este tipo de proceso, dado que este es el principal polisacárido presente en el sustrato. Al presentar una correcta degradación en la fase hidrolítica, se presenta una mejor actividad microbiana, puesto que las moléculas presentes son más simples y se logran sintetizar de una manera eficiente. Para ser metabolizadas en la fase acidogénica.

Ilustración 15. Medio de cultivo para celulosa de Mezcla de Frutas (F) y Verduras (V).



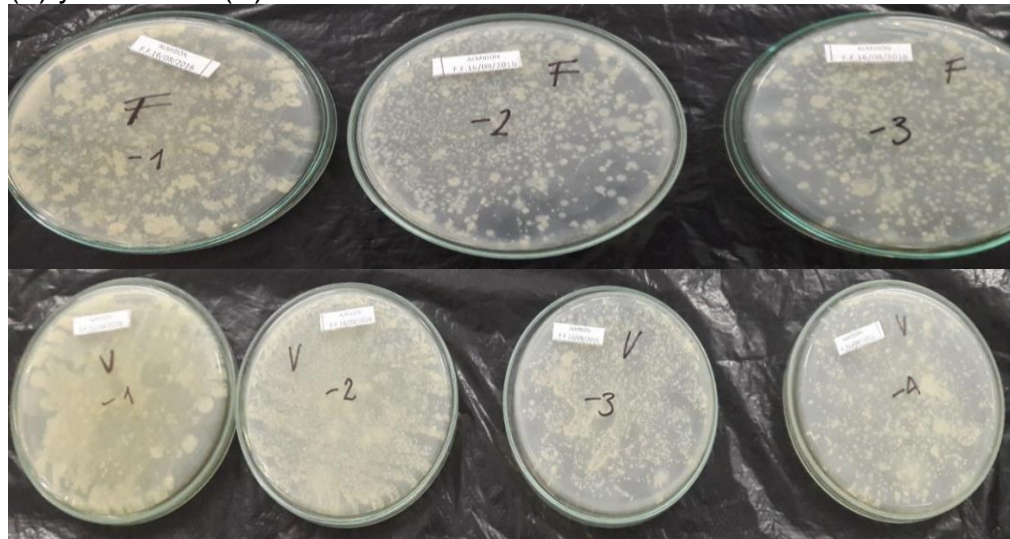
El agar tributirina se caracteriza por ser nutritivo y se encuentra suplementado con el triglicérido tributirina. Según las mezclas estudiadas (ver **Ilustración 16**) se presentan una mayor actividad hidrolítica de las lipasas en la mezcla de vegetales que la de frutas, debido al número de colonias obtenidas. La degradación de tributirina produce halos de aclaramiento alrededor de las colonias; en contraste con el resto del medio que permanece turbio, esto significa que los microorganismos presentes son capaces de secretar lipasas, las cuales son las encargadas de catalizar la hidrólisis de los enlaces éster, dando ácidos grasos de cadena corta tales como glicerol, ácidos grasos libres, diacilglicéridos, y monoacilglicéridos, que luego se transformaran en CO₂, ácido acético, H₂ entre otros.

Ilustración 16. Medio de cultivo para tributirina de Mezcla de Frutas (F) y Verduras (V).



La actividad amilolítica se determina mediante la presencia de halos de degradación alrededor de las colonias que implican las enzimas que intervienen durante la degradación (ver **Ilustración 17**), que son la β amilasa y α amilasa (como antes se describió en la metodología). Estos medios de cultivo se incubaron durante 48 horas a una temperatura de 35°C, obteniendo como resultado que la biomasa implementada presenta microorganismos amilolíticos, lo cual es bueno, ya que garantiza una correcta degradación en la fase hidrolítica, involucrando productos estables y útiles para implementarse posteriormente en las rutas metabólicas presentes en las fases siguientes.

Ilustración 17. Medios de Cultivo para Almidón de Mezcla de Frutas (F) y Verduras (V).



Teniendo en cuenta que la lignina es un sustrato xenobiótico (muy difícil de degradar), los microorganismos requieren de mayor tiempo, por lo tanto, se dejó encubando a 35°C durante 7 días en los cuales como se puede observar en la **Ilustración 18** si evidenciamos la presencia de este polisacárido, eso es importante teniendo en cuenta ya que encontrar microorganismos lignolíticos no es fácil y sabiendo que la estructura es muy compleja.

Ilustración 18. Medios de cultivo para Lignina de Mezcla de Frutas (F) y Verduras (V).



3.5 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Teniendo el residuo triturado y homogenizado con el agua y estiércol mediante la prueba de puño⁶³, en la cual se pudo determinar una humedad apropiada para llevar a cabo el proceso de degradación e ingreso adecuado de la materia orgánica, ya que el contenido de humedad aumenta conforme aumenta la profundidad, condición que provoca la disminución de temperatura.

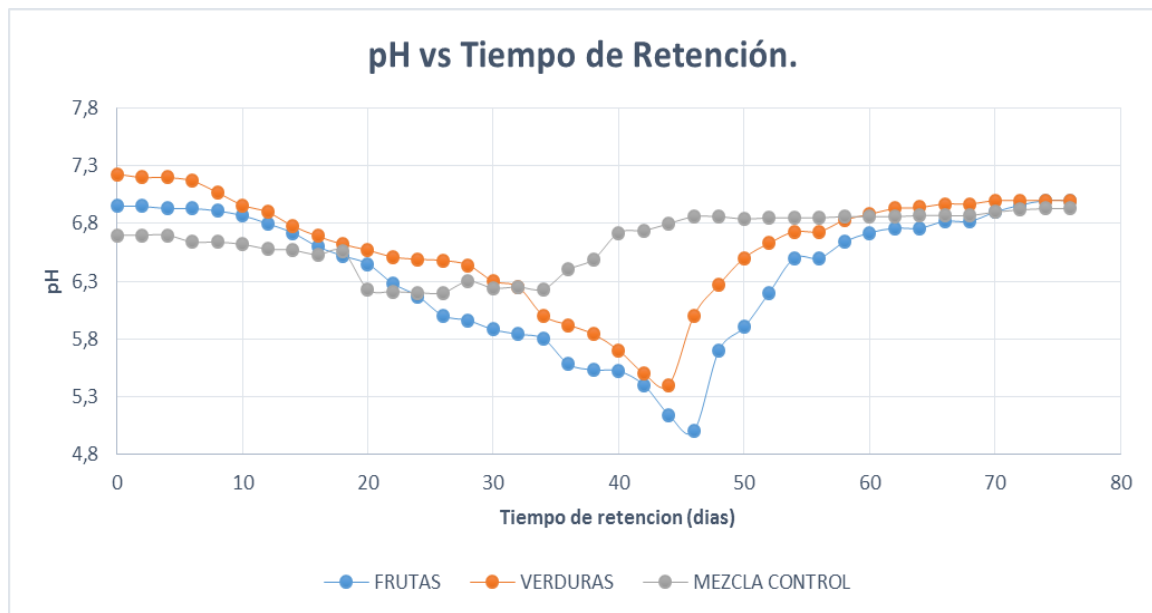
Para la alimentación en el digestor se registran datos de pH y temperatura de cada mezcla, al igual que la prueba de humedad, la cual debe presentar un valor entre 80 a 90%, para ello se realiza la prueba de puño en la cual se pudo determinar una humedad apropiada para llevar a cabo el proceso de degradación e ingreso de la materia orgánica. El funcionamiento del sistema de biodigestión se llevó a cabo en dos biodigestores. En el primero se llevó a cabo las tres primeras fases del proceso las cuales son aerobias, se decidió realizar la recirculación cada 2 días para garantizar el correcto mezclado de la biomasa, en cada recirculación, se tuvo un control de la temperatura y pH. En el segundo biodigestor se llevó a cabo

⁶³ AVENDAÑO ROJAS, Daniella. El Proceso De Compostaje. Chile.: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2003.

la fase metanogénica, debido a que esta es anaerobia, en esta fase también se tuvo un control de la temperatura y pH.

3.5.1 Comportamiento del pH. De acuerdo a los datos registrados (ver **ANEXO A.**) de los datos de pH con un tiempo de retención total del proceso de 80 días se puede observar su comportamiento en la (**Grafica 4.**).

Grafica 4. pH vs Tiempo de retención.



Para la mezcla de verduras el tiempo de retención fue de 44 días para la primera etapa, la cual está compuesta por la fase hidrolítica y acidogénica (Ver **Grafica 4**) según (Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility, 2011)⁶⁴, menciona que el tiempo de retención suele presentarse entre 35 a 50 días para llevarse a cabo estas fases, dependiendo el volumen de biomasa a degradar y la zona en la cual se está llevando a cabo el proceso de biodigestión, el tiempo de retención que presentó la mezcla de verduras fue favorable, debido a que se encuentra entre los límites antes mencionados, considerando que el proceso se realizó en una zona con clima frío y con un volumen de biomasa aproximada de 90 L. Esta mezcla inicio con un pH de 7,23 y tuvo una disminución hasta 5,4 conforme aumentaba el tiempo de retención, debido a la generación de diferentes enzimas extracelulares

⁶⁴ Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Op.cit., p.

de carácter hidrolítico tales como las amilasas, celulasas, proteasas, lipasas entre otras. Las cuales interactúan con la biomasa de dicha mezcla y la degrada para ser metabolizada, en el caso de los carbohidratos generando azúcares simples, las proteínas en aminoácidos, seguida por la oxidación de ácidos grasos para generar ácido acético. El pH óptimo para iniciar el proceso de biodigestión debe estar entre 6,8-7,5 y el pH de la fase acidogénica entre 8,5-4, encontrándose en los rangos anteriormente mencionados tanto al inicio como al momento de finalizar la fase acidogénica, demostrando que no se presentó inhibición al inicio de la fase acetogénica, ya que este suele ser la principal limitante para completar el proceso de biodigestión⁶⁵. El parámetro que se tuvo en cuenta para considerar el inicio de la etapa metanogénica, fue un aumento del pH y disminución de la temperatura que involucra la transformación de macromoléculas en moléculas más simples dando paso a la siguiente fase y de esta manera pasando la mezcla al tanque en el cual se lleva a cabo la segunda etapa del proceso, que está comprendida por la fase acetogénica y metanogénica.

En cuanto la mezcla de frutas el tiempo de retención fue de 46 días, con un pH el cual inicio en 6,95 y finalizo en 5, encontrándose en los rangos anteriormente mencionados y garantizando un correcto funcionamiento durante esta primera etapa. Como se puede observar la mezcla control mantuvo un pH más estable en comparación a la mezcla de frutas y verduras con un promedio de 6,5, por lo cual se puede evidenciar menor degradación de los carbohidratos que generan ácidos grasos, dióxido de carbono, alcohol e hidrógeno, que posteriormente serán catabolizados por varios grupos de microorganismos en la fase de acidogénesis.

3.5.2 Comportamiento de la temperatura. El contenido de hidratos de carbono se estructura por el compuesto de carbono, del cual los microorganismos toman su principal nutriente como alimento y así lo transforma en la energía para llevar a cabo la degradación de polisacáridos complejos tales como lignina, celulosa, proteínas y grasas, en moléculas más simples. Como se puede observar en el **ANEXO B**, las mezclas tuvieron un comportamiento exotérmico, debido por la energía cinética desprendida por la actividad microbiana presente en dicha fase. Durante el comportamiento de la temperatura se obtuvieron decaimientos de esta variable, Y según (GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto, et al. BIOGAS, 2014)⁶⁶, estos cambios se originan debido a la deshidrogenación de alcoholes y

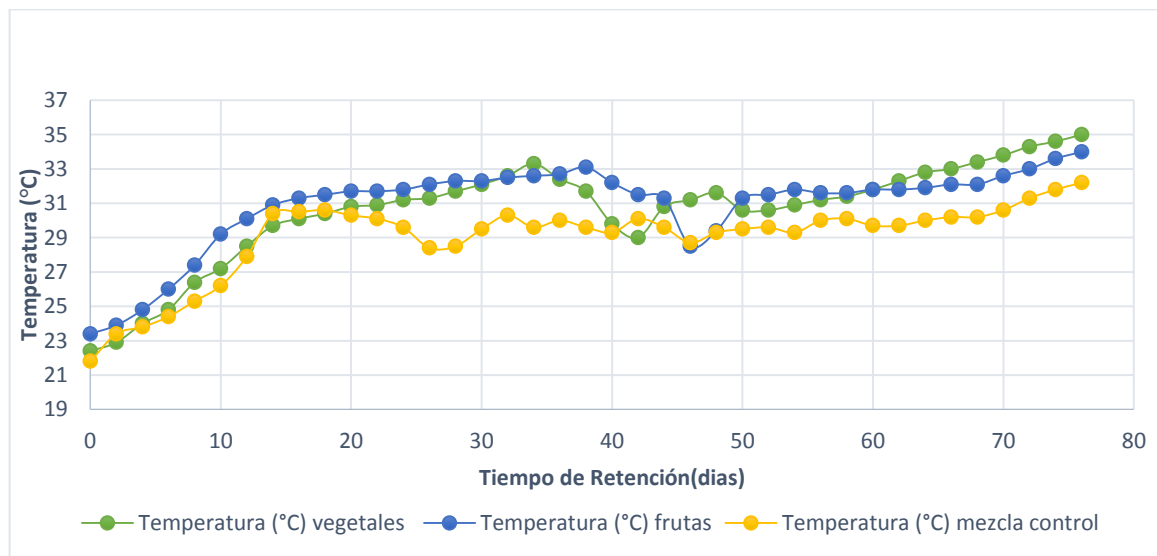
⁶⁵ GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto, et al. BIOGAS. Alternativa Ambiental En El Manejo De Residuos Para Su Uso Como Energético Sustentable. España. Op.cit., p.

⁶⁶ Ibid.,p

ácidos grasos procedentes de la fase acidogénica, aumentando el pH y a su vez generando una fase de latencia en los microorganismos.

Para la fase metanogénica, la mezcla de frutas inicio el día 56 con un registro de pH de 6,6, y con una temperatura equivalente a 31,6 °C y para la mezcla de vegetales, inicio en el día 52 con un pH de 6,8 y una temperatura de 30,6°C evidenciando una baja acumulación de ácidos generados durante el proceso de degradación y a su vez un menor tiempo de retención respecto a la mezcla de frutas, ambas mezclas se mantuvieron en un rango óptimo lo que asegura un buen funcionamiento de los digestores, ya que las bacterias productoras de metano son extremadamente sensibles a este factor, también se puede evidenciar que la temperatura no tuvo fluctuaciones durante el proceso, manteniéndose hasta aproximadamente los 35°C, dándose un proceso espontáneo, mientras que una disminución de dicha variable involucra una mayor dificultad en la degradación realizada por los microorganismos.(ver **ANEXO B**)

Grafica 5. Temperatura Vs Tiempo de retención



Para obtener una confiabilidad en el proceso y asegurar que la temperatura sea uniforme dentro del rango mesofílico para cada fase del proceso se realizó un análisis de transferencia de calor, evaluando las pérdidas entre las paredes del digestor y el entorno, sin utilizar un aislante térmico y utilizando la fibra de vidrio y el poliuretano como aislantes.

3.5.2.1 Análisis de transferencia de calor. Como se ha mencionado anteriormente es necesario el control de temperatura para mejorar la producción de biogás.

En este caso la transferencia de calor ocurre entre una superficie sólida y los alrededores de un fluido, siendo un mecanismo de transferencia por convección.

Para el análisis de transferencia se realiza una comparación de las pérdidas de calor sin aislante y con aislante, debido a que las diferencias de temperaturas entre las mezclas no son muy significantes se realizará el análisis con la mezcla de vegetales únicamente.

Pérdidas de calor por las paredes. La temperatura al rango mesofílico corresponde a $T_{\text{dig max}} [^{\circ}\text{C}] = 35(\text{V})$ y $34(\text{F})$ y al exterior la mínima temperatura del entorno de acuerdo con la **Tabla 12** fue de $T_{\text{ent min}} = 4^{\circ}\text{C}$.

Para determinar el calor perdido general a través de las paredes por convección se determina de la siguiente manera⁶⁷.

Ecuación 2

$$q_{ps} = h * A * \Delta_T$$

• **SIN AISLANTE:**

Ecuación 3

$$\frac{q}{L} = \frac{A\Delta_T}{\frac{1}{h_1 * r_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_1} + \frac{1}{h_2 * r_2}}$$

Si no se utiliza ningún tipo de aislante la pérdida de calor por el área de intercambio térmico con dirección radial es:

$$A = 2\pi rL$$

⁶⁷ HOLMAN, J. P. Transferencia De Calor. 1999. 621 p.

Donde

h_1 y h_2 : son los coeficientes de transferencia de calor del fluido y del ambiente respectivamente.

L: longitud del tanque en metros [m]

r_1 y r_2 : son los radios interior y exterior del tanque de polietileno metros [m]

Los coeficientes de transferencia de calor como dependen de la velocidad del fluido y de sus propiedades se pueden asumir como:

h_1 : $4000 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right]$; para un líquido agitado con convección forzada debido a que el movimiento se lo da un aparato mecánico.

h_2 : $10 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right]$; Esto para el ambiente que rodea al digestor tomando el rango máximo para una convección natural que es producto de un gradiente de densidad

Por lo tanto:

Ecuación 4

$$q = \frac{2\pi * 0,8m * (35 - 4)^\circ C}{\frac{1}{4000 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right] * 25m} + \frac{\ln\left(\frac{26}{25}\right)}{0,042 \left[\frac{W}{m * ^\circ C} \right]} + \frac{1}{10 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right] * 26m}}$$

$$q = \frac{155,8229}{0,9377} = 166,18 \text{ Watts}$$

- **CON AISLANTE:** Como la cámara de almacenamiento del fluido está recubierta por dos aislantes térmicos los cuales son la espuma de poliuretano y la fibra de vidrio, el tanque de polietileno tiene un diámetro interior de 50 cm y espesor de 1 cm y se recubre con poliuretano con espesor 3 cm y este a su vez con fibra de vidrio con espesor de 5,3 cm, cuya conductividad térmica es⁶⁸;

⁶⁸ MIRAVETE, Antonio. Los Nuevos Materiales En La Construcción. Reverte ed. 1995. P. 394

$K_1 = 0,042 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$; Conductividad térmica del polietileno

$K_2 = 0,035 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$; Conductividad térmica de la fibra de vidrio

$K_3 = 0,029 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$; Conductividad térmica del poliuretano

Mientras que las pérdidas de calor con aislamiento se calculan de la siguiente manera⁶⁹:

Ecuación 5

$$q = \frac{2\pi L \Delta T}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_2} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_3}}$$

$$q = \frac{2\pi * 0,8m(35 - 4)^\circ C}{\frac{\ln\left(\frac{26}{25}\right)}{0,042 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} + \frac{\ln\left(\frac{29}{26}\right)}{0,035 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} + \frac{\ln\left(\frac{34.3}{29}\right)}{0,029 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}}$$

$$q = \frac{155,8229}{8.908} = 17,49[Watts]$$

La transferencia de calor con los aislantes térmicos descritos anteriormente respecto sin aislante evidencia una disminución en las pérdidas de calor de las paredes del digestor con el entorno en más de un 60%, demostrando que la temperatura se mantiene uniforme durante el proceso, permaneciendo de manera estable, con pérdidas de calor prácticamente despreciables, mientras este aislado del ambiente externo utilizando fibra de vidrio y poliuretano.

3.5.3 Determinación de parámetros a la salida del proceso. Estos parámetros son importantes para identificar al final del proceso que se haya llevado a cabo

⁶⁹ HOLMAN, J. P. Transferencia De Calor. 1999. 621 p.

una buena producción de biogás >60% teniendo porcentajes pequeños de sólidos totales, siendo este la materia que queda como residuo ya sin ningún aprovechamiento, y a partir del resultado de los sólidos volátiles se puede realizar un aproximado de la cantidad de biogás producido y de esta manera determinar y evaluar la viabilidad de la proyección del proceso de escala piloto a escala industrial.

3.5.3.1 Sólidos totales y volátiles. Se determinaron mediante un análisis gravimétrico en las instalaciones de tecno parque y los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 16**. Su determinación se basó en una medición cuantitativa, evaluando el incremento de peso de una capsula adecuada al volumen determinado de la muestra, tras la evaporación de una muestra y secado a peso constante, a una temperatura entre 103 a 105 °C, La metodología y los cálculos realizados se muestran en el **ANEXO E**.

Tabla 16. Resultados de los análisis de sólidos totales para cada mezcla.

Parámetros	Mezcla Residuos de frutas	Mezcla Residuos de verduras	Mezcla Control
Sólidos Totales (%)	3,73	3,23	3,62
Sólidos Volátiles (mg/L)	17,37	25,99	35,27

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que los sólidos totales presentan un porcentaje <5% para cada mezcla y sólidos volátiles para los residuos de frutas de 17,37 mg/L y para los residuos de vegetales de 25,99 mg/L lo que quiere decir que el contenido de materia disuelta presente en el efluente es poca comparada con la mezcla control con un contenido de sólidos de 35,27mg/L, por tanto, la mayoría de los macronutrientes sirvieron como fuente nutricional para los microorganismos y la producción de biogás aumenta a medida que disminuyen los sólidos totales y volátiles, “Un intervalo adecuado del contenido de sólidos totales en el proceso se encuentra entre un 3% a 9%” ⁷⁰, su resultado está condicionado por la temperatura y la duración de la desecación en el proceso.

⁷⁰ Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Op.cit., p.84

De acuerdo con (VEREDA ALONSO et al. 2006)⁷¹ los residuos sólidos de frutas y verduras se caracterizan no solo por su elevado contenido de humedad sino también por su alto contenido de sólidos volátiles pudiendo llegar a ser más del 95% de los sólidos totales presentando entre el 8 y 18% en peso de estos, de acuerdo con esto comparado con el resultado de sólidos totales y volátiles obtenidos del efluente al finalizar el proceso, se obtuvo una reducción significativa con un porcentaje mayor al 80% de reducción de sólidos volátiles respecto a los sólidos totales, transformando de manera eficiente la materia orgánica a productos como el metano y dióxido de carbono, “en general la fracción orgánica incluye en torno a un 75% de azúcares y hemicelulosa, 10% de celulosa y 5% de lignina”⁷².

El control de los sólidos volátiles durante el tiempo de retención de la mezcla contenida en el biodigestor se puede determinar el volumen de biogás periódicamente y de esta manera evaluar la producción de metano hasta finalizar el proceso. Otros autores estiman la producción de metano en función de la DQO eliminada o sólidos volátiles destruidos como se mencionaba anteriormente estableciendo como valores de 1 a 1,25 m³ de metano por kg de sólidos volátiles destruidos o bien de 0,3 a 0,42 m³ de metano por kg de DQO destruido⁷³.

3.5.3.2 DQO. Para la demanda química de oxígeno que se realizó en tecno parque, los resultados para cada mezcla se muestran en la **Tabla 17**, y los cálculos se pueden observar en el **ANEXO D**.

Tabla 17. Resultados DQO para cada mezcla.

Parámetro	Mezcla Residuos de frutas	Mezcla Residuos de verduras
DQO (mg/L)	1142,25	1097,25

La mezcla que tuvo la mayor eliminación de DQO es la de verduras lo que significa que está directamente relacionada con la producción de biogás. La demanda química de oxígeno representa indirectamente el contenido de materia orgánica de un residuo a través del oxígeno necesario para oxidar químicamente.

⁷¹ VEREDA ALONSO, C.; GÓMEZ LAHOZ, F. y RODRIGUEZ MAROTO, J., M. Producción de biogás a partir de residuos vegetales. En: UNIVERSIDAD DE MALAGA. vol. 1,2006.

⁷² VERRIER, D, RAY, F. y ALBAGNAC, G. “Two-methanization of solid vegetable wastes”. Biol. Wastes. 22, 163-77 (1987).

⁷³ MANDUJANO SÁNCHEZ, Porfirio. Digestión Anaerobia De Sólidos En Alta Concentración. España, Madrid.: Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

De acuerdo con diversos autores un efluente con carga orgánica soluble 1500-50000 mg/l DBO, se elimina un 85-90%, con una producción gas 0,8 m³ / kg DBO⁷⁴., al disminuir este factor indica que la actividad microbiológica, así como las condiciones anaerobias, están directamente relacionados con la degradación de la materia orgánica, redujeron su actividad y con ello el consumo de oxígeno.

3.5.4 Cromatografía de gases. De acuerdo a los resultados obtenidos en la cromatografía realizada al biogás recolectado para cada mezcla del proceso se puede observar que la mezcla con mayor porcentaje de metano fue la mezcla de vegetales con 69,5% de metano, como se puede observar en la **Tabla 18** y **ANEXO D**

Tabla 18. Resultados cromatografía de gases

MEZLCLAS	% Metano
Control	64,1
Residuos de Frutas	67,7
Residuos de Verduras	69,5

3.5.4.1 Balance de masa y energía. Se realiza un balance de masa para determinar el valor másico de gases que se disipan al medio ambiente en la primera etapa del proceso (fase hidrolítica), como se puede observar en el Diagrama 3.

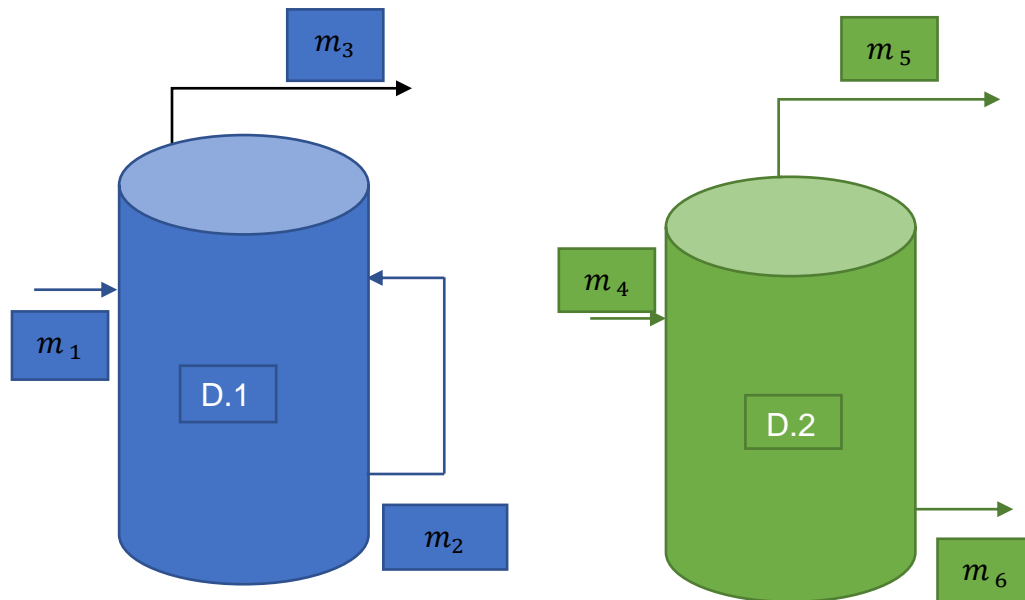
La degradación de la materia orgánica implica aspectos de carácter energético, los cuales se pueden analizar desde parámetros termodinámicos y cinéticos, con balances de materia y energía, con un volumen de carga orgánica seleccionado. De acuerdo al diseño del reactor, se determina la cantidad de gases generados en las etapas del proceso, y de esta manera se puede predecir una producción diaria de biogás, desde procesos a escala laboratorio, planta piloto y lograr una

⁷⁴ MATA ALVAREZ, J. Digestión Anaerobia de Residuos Sólidos Urbanos. Estudios monográficos, Iuputación de Barcelona. 2002

proyección a escala industrial. El análisis termodinámico permite conocer los requerimientos energéticos de las reacciones y la dirección de estas de acuerdo al criterio de energía libre, y un análisis cinético permite establecer la relación o influencia de los parámetros fisicoquímicos en el desempeño global del proceso.

Este balance se define por las variaciones que ocurren durante una reacción en un sistema cerrado específico. Y es uno de los elementos conceptuales más importantes para el desarrollo de un proceso, puesto que mediante estos balances se puede describir los subproductos de consumo o generación de materia dentro de un sistema definido. En este caso se desarrolla un balance de materia y energía que sirve como base para identificar cuál de las dos mezclas formuladas genera mayor cantidad de biogás en la etapa metanogénica reduciendo la emisión de gases contaminantes en la primera etapa del proceso (fase hidrolítica), y de esta manera poder tener una aproximación de la cantidad de gas generado en un reactor por etapas con un volumen de carga discontinua y un sistema de recirculación determinado.

Diagrama 3. Balance en flujos másicos



• Balance Global

Ecuación 6

$$m_1 = m_3 + m_5 + m_6$$

Donde

m_1 : 60 kg de la mezcla de residuos.

m_3 : Cantidad en kg de gas que se disipó en el ambiente ¿?

m_5 : Kg de biogás obtenido para la mezcla

m_6 : 56 kg de residuos a la salida del digestor para la mezcla de verduras y frutas respectivamente.

Por tanto

$$m_3 = m_1 - m_5 - m_6$$

El volumen de biogás obtenido se determinó de acuerdo a los sólidos volátiles de la materia orgánica, obtenidos dentro del reactor al final del proceso, y el porcentaje de conversión anaeróbica de metano de manera teórica se estima habitualmente en $0,15 \text{ m}^3/\text{kg}$ de sólidos volátiles⁷⁵. La eficiencia de la producción de biogás se determina generalmente expresando el volumen de biogás producido por unidad de sólidos volátiles.

Para la mezcla de frutas el volumen del biogás es;

$$\text{Volumen de Biogás: } 17,37 \text{ kgSV} * 0,15 \frac{\text{m}^3}{\text{kgSV}} = 2,61 \text{ m}^3$$

Para la mezcla de verduras el volumen del biogás es;

$$\text{Volumen de Biogás: } 25,99 \text{ kg SV} * 0,15 \frac{\text{m}^3}{\text{kgSV}} = 3,90 \text{ m}^3$$

De esta manera la cantidad de biogás en términos máxicos es la siguiente respecto a la densidad del biogás que es de $0,656 \text{ kg/m}^3$ ⁷⁶

Para la mezcla de frutas:

⁷⁵ KIELY, Gerard. Ingeniería Ambiental: Fundamentos, Entornos, Tecnologías, y Sistemas De Gestión. McGraw-Hill, 1999. ISBN 41-481-2149-X

⁷⁶ Ibd., p

$$m_5: 0,656 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 2,6055 \text{ m}^3 = 1,71 \text{ kg}$$

Para la mezcla de verduras:

$$m_5: 0,656 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 3,8985 \text{ m}^3 = 2,56 \text{ kg}$$

Entonces;

Para la mezcla de frutas:

$$m_3 = 60\text{kg} - 1,71\text{kg} - 56\text{kg}$$

$$m_3 = 2,20 \text{ kg}$$

Para la mezcla de verduras:

$$m_3 = 60\text{kg} - 2,56\text{kg} - 56\text{kg}$$

$$m_3 = 1,44 \text{ kg}$$

• Balance D.1

Para el caso de un sistema con agitación en el cual se supone un mezclado total de la materia orgánica, la concentración de entrada se puede suponer como igual a la concentración en el interior del digestor y de esta manera se asume que el volumen del digestor no cambia con el tiempo por lo tanto la ecuación de balance general de masa puede ser escrita de la siguiente manera.

Ecuación 7

$$m_1 = m_2 + m_3$$

Por tanto

$$m_2 = m_1 - m_3$$

$$m_2 = 60\text{kg} - 14,99\text{kg}$$

$$m_2 = 45,00\text{kg}$$

• Balance D. 2

Ecuación 8

$$m_4 = m_5 + m_6$$

Sin embargo, al final del proceso $m_4 = m_2$

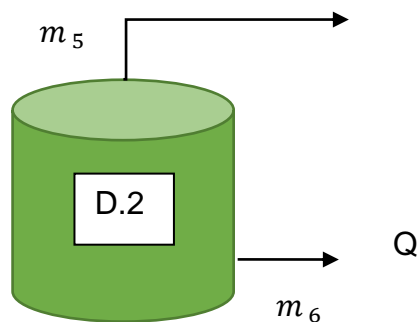
Este balance de masa se realiza con el fin de saber la cantidad en masa de los gases que se disiparon al ambiente en la primera etapa del proceso, los cuales en su mayoría son dióxido de carbono, y comparando la cantidad másica de gases que sale en las dos mezclas formuladas, se puede identificar que la mezcla de residuos de frutas presentó una mayor cantidad de gases que se disiparon al ambiente en la primera etapa del proceso a comparación con la mezcla de residuos de vegetales

En cuanto al balance de energía se llevará a cabo en la última etapa del proceso (fase metanogénica) para determinar el calor liberado, siendo un proceso exotérmico. El balance energético positivo (altos niveles de metano y bajos niveles de gases contaminantes con alto poder calorífico) incide en una notable reducción de los costes de operación en la planta de tratamiento.

3.5.4.2 Balance de energía del proceso. Este tipo de balances principalmente en el digester anaerobio en el cual se lleva a cabo la fase metanogénica, proporciona información sobre la salida de calor.

Cuando mayores sean los sólidos volátiles o de carbono disponible, mayor es el potencial de energía.

Diagrama 4. Balance de energía.



Ecuación 9

$$\overset{0}{E} - \overset{0}{S} - \overset{0}{G} = A$$

Ecuación 10

$$\int_{T_1}^{T_2} -\dot{Q} = \sum \frac{dU}{dt} = m \frac{dU}{dt} = \int_{T_1}^{T_2} m C_v \frac{dT}{dt}$$

Por tanto

$$\begin{aligned} -Qt &= \sum m * C_v * \Delta T \\ -Qt &= m_5 * C_v * (T_2 - T_1) + m_6 * C_v * (T_2 - T_1) \end{aligned}$$

Como la diferencia en la temperatura de entrada con respecto a la de salida no es significativa el coeficiente de calor específico a volumen constante (C_v) es igual durante todo el proceso.

Este coeficiente se calcula mediante un promedio de los calores específicos a presión constante (C_p) de cada alimento, agua y estiércol presentes en las mezclas, teniendo:

Ecuación 11

$$Q = m_5 \frac{dU}{dt} + m_6 \frac{dU}{dt}$$

Donde

$$\frac{dU}{dt} \approx \frac{dH}{dt}$$

Si la energía interna es:

Ecuación 12

$$U = H - PV$$

Entonces;

$$dU \approx dH - P dv - V dp$$

Como es un volumen constante,

Ecuación 13

$$dH = C_{p_{promedio}} dT$$

Dónde:

$$Cp_{promedio} = X * Cp_{agua} + X * Cp_{vegetales} + X * Cp_{Estiercol}$$

Por tanto:

Ecuación 14

$$Q = Cp\Delta T * (m_5 + m_6)$$

Como se puede observar en la **Tabla 21**, los alimentos tienen un calor específico cercano al agua, al igual que el del estiércol, de esta manera se dice que $Cp_{prom} = Cp_{agua,prom}$. Y de acuerdo con la formulación de sustratos (ver **Tabla 14** y **Tabla 15**) se tiene que para un total de 60 kg, el flujo másico del agua, estiércol y residuos de verduras se muestra en la **Tabla 19**, y para los residuos de frutas se muestra en la **Tabla 20**.

Tabla 19. Flujo Másico, mezcla residuos de verduras.

	Cantidad (Kg)	Flujo másico X
Residuos verduras	20	0,33
Agua	20	0,33
Estiércol	20	0,33

Tabla 20. Flujo Másico, mezcla residuos de frutas

	Cantidad (Kg)	Flujo másico X
Residuos frutas	20	0,33
Agua	15	0,25
Estiércol	25	0,42

Tabla 21. Propiedades de alimentos comunes.

c) Alimentos					
Alimentos	Contenido de agua, % (masa)	Punto de congelación, °F	Calor específico, Btu/lbm · R		Calor latente de fusión Btu/lbm
			Por encima del punto de congelación	Por debajo del punto de congelación	
Brócoli	90	31	0.921	0.471	129
Camarón	83	28	0.865	0.450	119
Carne de pollo	74	27	0.793	0.423	106
Carne de res	67	—	0.737	0.402	96
Cerezas	80	29	0.841	0.441	115
Espinaca	93	31	0.945	0.481	134
Fresas	90	31	0.921	0.471	129
Helado	63	22	0.705	0.390	90
Huevo entero	74	31	0.793	0.423	106
Leche entera	88	31	0.905	0.465	126
Lechuga	95	32	0.961	0.487	136

Alimentos	Contenido de agua, % (masa)	Punto de congelación, °F	Calor específico, Btu/lbm · R		Calor latente de fusión Btu/lbm
			Por encima del punto de congelación	Por debajo del punto de congelación	
Mantequilla	16	—	—	0.249	23
Manzanas	84	30	0.873	0.453	121
Maíz dulce	74	31	0.793	0.423	106
Naranjas	87	31	0.897	0.462	125
Papas	78	31	0.825	0.435	112
Pavo	64	—	0.713	0.393	92
Plátanos	75	31	0.801	0.426	108
Queso suizo	39	14	0.513	0.318	56
Salmón	64	28	0.713	0.393	92
Sandía	93	31	0.945	0.481	134
Tomates (maduros)	94	31	0.953	0.484	135

Fuente: CENGEL, Yunes y BOLES, Michael. Termodinámica, 2012⁷⁷.

Entonces el C_p promedio de las mezclas es:

Para la mezcla de residuos de verduras:

$$C_{p_{promedio}} = 0,33 * 4,22 + 0,33 + 0,33 * 4 = 4,03 \frac{J}{Kg * ^\circ C}$$

Para la mezcla de residuos de frutas:

$$C_{p_{promedio}} = 0,33 * 4,22 + 0,25 * 4 + 0,42 * 4 = 4,07 \frac{J}{Kg * ^\circ C}$$

Remplazando en la **Ecuación 14**; entonces:

Para la mezcla de residuos de frutas:

$$Q = \left[4,07 \frac{J}{Kg * ^\circ C} * (34 - 31,6)^\circ C \right] * (1,71 + 60)kg = 603,16 J$$

Para la mezcla de residuos de verduras:

$$Q = \left[4,03 \frac{J}{Kg * ^\circ C} * (35 - 30,6)^\circ C \right] * (2,56 + 60)kg = 1109,9 J$$

⁷⁷ CENGEL, Yunes y BOLES, Michael. Termodinámica. séptima ed. McGraw-Hill, 2012. 907 p. ISBN 978-607-15-0743-3

De esta manera se puede identificar la mezcla que genero mayor cantidad de calor en el proceso fue la de residuos vegetales, y de acuerdo a esto durante el proceso de descomposición, la energía que se produjo en forma de calor se vuelve muy importante, principalmente para la eliminación de microorganismos patógenos.

3.5.5 Diseño de experimentos. Para determinar cuál de las mezclas anteriormente formuladas es la mejor, se realiza un diseño de bloques (ver **Tabla 22**), seguido por una tabla ANOVA con un nivel de significancia del 0,05. Este tipo de diseño analiza tanto el efecto de los factores sobre la variable respuesta, como una variable de interés en presencia de una variable que debe ser controlada. En el cual se selecciona como factor potencial de diseño las mezclas formuladas, ya que poseen diferentes residuos. Por otro lado, se escogió el pH al cual culmina cada fase como factor perturbador controlable, para determinar si posee un efecto directo sobre el tiempo de retención que es la variable respuesta. La mezcla de frutas estará representada por el número 1, la mezcla de vegetales por el número 2, y la mezcla control por el número 3. Los niveles corresponden a la culminación de cada fase involucrada durante el proceso de biodigestión, generando tres niveles. El primero corresponde a la fase hidrolítica, el segundo a la fase acidogénica y el tercero corresponde a la fase metanogénica. El propósito de este estudio es seleccionar cual mezcla presenta un menor tiempo de retención, con un mayor porcentaje de metano (ver **ANEXO A.**).

Tabla 22. Diagrama de bloques.

Mezcla	pH			Σ Sumatoria Filas
	Hidrólisis	Acidogénesis	Metanogénesis	
1	34	46	80	160
2	26	44	74	144
3	18	34	70	122
Σ Sumatoria Columnas	78	124	224	426

A continuación, se presentan los respectivos cálculos para completar la tabla ANOVA y posteriormente hallar la F teórica, evaluando si se aceptan o se rechazan las hipótesis que más adelante se mostraran.

Tabla 23. Resultados Sumas de Cuadrados.

Suma de Cuadrados Totales (SCT)	3976
Suma de Cuadrados Entre tratamientos(SCEtr)	242,7
Suma de Cuadrados Entre bloques(SCEbl)	3714,7
Suma de Cuadrados dentro de tratamientos – error residual (SCDer)	18,7

Tabla 24. Tabla ANOVA.

Fuentes de Variación.	Suma de Cuadrados (SC)	Grados de Libertad (GL)	Cuadrados medios (CM)	F (teórica)
Entre Tratamientos.	242,7	2	121,33	25,8
Entre Bloques.	3714,67	2	1857,3	395,2
Dentro de Tratamientos (error residual)	18,7	4	4,7	
Total	3976	8	497	

$F_{0,05,2,4}=6,94$ (ver **Anexo E**)

- **HIPOTESIS:** De acuerdo a los factores definidos se establecen las hipótesis, las cuales buscan rechazar las hipótesis nulas, es decir demostrar que las mezclas y el pH en el cual culmina cada fase tienen efecto en el tiempo de retención, y a su vez sobre la concentración de metano.

Entre Tratamientos (**Mezclas**).

H0: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

No hay diferencia significativa de las mezclas sobre el tiempo de retención.

H1: $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

Hay diferencia significativa de las mezclas sobre el tiempo de retención.

Entre Bloques (pH)

H0: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

No hay diferencia significativa del pH sobre el tiempo de retención.

H2: $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

Hay diferencia significativa del sobre el tiempo de retención.

Tabla 25. Resultados de la tabla Anova.

Hipótesis	F calculada	F tablas
H1	25,8	6,9
H2	395,2	6,9

De acuerdo a la anterior tabla las hipótesis H1 Y H2 son aceptadas, es decir que si hay una diferencia significativa de las mezclas y el pH al cual culminar cada fase durante todo el proceso con respecto al tiempo de retención total. Lo que involucra que el mejor sustrato a implementarse tiende a presentar menor variabilidad en cuanto al pH y temperatura, puesto que una gran disminución de estas variables en la fase acidogénica según (GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto, et al. BIOGAS, 2014)⁷⁸, puede llegar a inhibir los microorganismos presentes o retardar el proceso de degradación. Aunque la mezcla control es la primera en llegar a la fase metanogénica, no presenta un buen rendimiento, debido a que su porcentaje de metano (ver **Anexo D**) es bajo teniendo en consideración a las otras mezclas. En cuanto a la mezcla de frutas es la que presenta un mayor tiempo de retención para llegar a la etapa metanogénica, ya que tuvo la mayor disminución de pH de todas las mezclas en la etapa acidogénica, lo que involucra un aumento del tiempo de retención para que los microorganismos “logren transformar la acumulación de estos ácidos en ácido acético y CO₂ entre otros”⁷⁹. Por último, la mezcla de vegetales tuvo un buen tiempo de retención, teniendo en cuenta que presentaba mayor materia orgánica para degradar en comparación a la mezcla control, demostrando condiciones adecuadas durante todo el proceso como se explica anteriormente en los análisis del comportamiento del pH y temperatura, obteniéndose un porcentaje de metano 69,5%, siendo favorable, según varios

⁷⁸ GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto, et al. BIOGAS. Alternativa Ambiental En El Manejo De Residuos Para Su Uso Como Energético Sustentable. España,2014, Op.Cit.,p

⁷⁹ Ibid.,p

autores “el promedio de metano presente en el biogás es de 65%”⁸⁰. Teniendo en cuenta este último parámetro, la implementación de esta mezcla aumenta la eficiencia del proceso y a su vez genera una alternativa de aprovechamiento de los residuos vegetales.

⁸⁰ Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. Op.cit.,p

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados presentados se presenta a continuación las conclusiones:

- Teniendo en cuenta los diferentes estudios estadísticos acerca de la oferta de residuos que se generan e ingresan mensualmente a la central de abastos de Bogotá, la caracterización realizada, así como la matriz de selección; se pudo concluir que la uva, la piña, la remolacha, el apio, la espinaca, el melón, la sandía, y el tomate, fueron los residuos seleccionados que están presentes y que tienen mayor regularidad en cada mes del año; por lo cual pueden ser aprovechados mediante el tratamiento de digestión anaerobia gracias a sus propiedades fisicoquímicas y contenido de macronutrientes y micronutrientes, con proporciones 1:1 entre los vegetales y estiércol y 1:2 entre estiércol:agua, demostrando una biomasa homogénea con una humedad mayor al 80%, lo que representaría una disminución de costos en su disposición final generando una alternativa energética sustentable.
- Se evidenció que es necesario implementar un aislante térmico, para garantizar una temperatura uniforme durante el proceso y a su vez una mayor eficiencia, demostrando que las pérdidas de calor entre las paredes del biodigestor y el entorno disminuyen significativamente en un porcentaje mayor al 60% con aislante que sin él, asegurando un entorno favorable para la flora microbiana y disminuyendo tiempos de retención al mantener una temperatura en un rango mesofílico y sin cambios drásticos durante el proceso.
- La fase experimental permitió determinar que la mezcla de vegetales presentó una mayor estabilidad en el pH y temperatura, debido a la baja acumulación de ácidos generados durante el proceso de degradación y a su vez un menor tiempo de retención respecto a la mezcla de frutas. Con respecto a la mezcla de control, la mezcla de vegetales presentó gradientes de pH mínimos estando entre un rango de 6,2 a 7 y sin cambios significativos de temperatura iniciando en 21°C para finalizar a 32°C, generando tiempos de retención cortos, puesto que la actividad microbiana fue baja, presentando menor materia orgánica para hidrolizar.
- Los microorganismos presentes en las mezclas de frutas y vegetales tuvieron un crecimiento en medios celulíticos, lipolíticos, amilolíticos, proteolíticos y lignolulíticos, por lo cual se puede concluir que la selección de estas mezclas de

acuerdo a su contenido nutricional y relación de carbono/nitrógeno, así como la formulación en proporciones 1:1 con el estiércol y agua seleccionadas son adecuadas para la producción de biogás.

- A partir del análisis estadístico elaborado (ANOVA) y el resultado de la cromatografía de gases, el mejor sustrato para implementarse en la producción de biogás es la mezcla compuesta por vegetales, presentando un tiempo de retención de 50 días para las tres primeras fases y un porcentaje de metano de 69,5%, garantizando una formulación adecuada entre los residuos, así como el control y estabilidad de pH, la temperatura óptima para cada fase, y sin que se presente inhibición de los microorganismos.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda evaluar la relación de ácidos grasos volátiles al inicio del proceso, debido a que durante este puede ocurrir una acumulación de ácidos y puede llevar a una total acidificación si no se controlan, y disminuir la producción de metano al ocasionar una inhibición en la etapa, lo que pudo ocurrir con la mezcla de frutas cuando disminuyo el pH a 5 entrando en la etapa metanogénica viéndose reflejado un aumento significativo pasando a 5,7 y 6.
- Para tener una mayor precisión al momento de recolectar el gas, se recomienda instalar un medidor de presión y evaluar en que momento ocurre la mayor producción de gas, como un aumento de presión en el interior del digestor.
- Se recomienda realizar una correlación de la humedad medida por la prueba de puño, con la humedad medida en laboratorio y establecer el error para determinar la confiabilidad de dicha prueba.
- Se sugiere implementar un sistema de limpieza del biogás producido para su aprovechamiento en generación de energía eléctrica y correspondiente factibilidad económica, es decir, estimar la cantidad de energía eléctrica que se puede producir correlacionándola con la demanda energética en la finca La Esperanza, ubicada en el municipio de Sibaté, para hacer más atractivo el proyecto para futuras inversiones. De igual forma, se recomienda realizar un estudio más detallado en la biomasa resultante del proceso de digestión anaerobia para determinar su composición y posibles productos de interés que den valor agregado al proyecto.
- Se recomienda realizar una mezcla entre los vegetales y frutas anteriormente seleccionadas, medir su tiempo de retención, así como el metano obtenido y compararlo con los resultados obtenidos en este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- ARIUNBAATAR, Javkhlan, et al. Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. En: APPLIED ENERGY. 6/15, 2004.vol. 123, p. 143-156
- AVENDAÑO ROJAS, Daniella. El Proceso De Compostaje. Chile.: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2003.
- BOGOTA TORRES, Juliana; DIAZ RICARDO, Sandra y RAMOS OCAMPO, Priscila. Montaje y Puesta En Marcha De Dos Biodigestores Orgánicos Generados En La Central De Mercado "Plaza Kennedy" En Bogotá. Colombia.: Universidad Manuela Beltrán, 2008. 121p.
- CAMPOS, Elena; ELÍAS CASTELLS, Xavier y FLOTATS, Xavier. Procesos Biológicos: La Digestión Anaerobia y El Compostaje. España: Ediciones Díaz de Santos, 2012.
- CARDONA ALZATE, Carlos Ariel, et al. Biodegradación De Residuos Orgánicos De Plazas de Mercado. En: 2004. Vol. VI, no. 2, p. 78-89
- CASTELLS, Xavier Elías. Tratamiento y Valorización Energética De Residuos. Díaz de Santos ed. 2012. 1255 p.
- CENGEL, Yunes y BOLES, Michael. Termodinámica. Séptima ed. McGraw-Hill, 2012. 907 p. ISBN 978-607-15-0743-3
- CORPORACIÓN DE ABASTOS S.A. Plan Estratégico De Manejo Integral De Residuos Sólidos. Bogotá. Disponible en: <http://www.corabastos.com.co/sitio/index.php>,2015.
- DI MARÍA, Francesco y BARRATTA, Martino. Boosting methane generation by co-digestion of sludge with fruit and vegetable waste: Internal environment of digester and methanogenic pathway. En: [HTTP://www.NCBI.NLM.NIH.gov/pubmed/26101199](http://www.NCBI.NLM.NIH.gov/pubmed/26101199),2015 .Vol. 43, no. Waste management, p. 130-6
- DÍAZ BAEZ, María Consuelo; ESPITIA VARGAS, Sandra Eliana y MOLINA PEREZ, Francisco. Digestión Anaerobia. 2002. 164-37 p. ISBN 95870111
- DONG, Xiaoying, et al. Biogas by two-stage microbial anaerobic and semi-continuous digestion of Chinese cabbage waste. En: CHINESE JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING. 5, 2015.vol. 23, no. 5, p. 847-852

ESCALANTE HERNANDEZ, Humberto, *et al.* Atlas Del Potencial Energético De La Biomasa Residual En Colombia. [Electronic (1)]:Unidad de Planeación Minero Energética, UPME; Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Ideam; Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias; Universidad Industrial de Santander, UIS ed. Colombia: 2012. 141 p.

EXUR, L. Tabla De Composición Nutricional. [Electronic (1)]. Disponible en: <http://www.dietas.net/tablas-y-calculadoras/tabla-de-composicion-nutricional-de-los-alimentos/frutas/frutas-frescas.html>, 2015.

FOCER. Manuales Sobre Energía Renovable BIOMASA. Costa Rica: Copyright, BUN-CA, 2002. 56 p. ISBN 9968904023

GAITÁN BOHÓRQUEZ, Diana María y PÉREZ PÉREZ, Liliana Ibeth. Aislamiento y Evaluación De Microorganismos Celulíticos a Partir De Residuos Vegetales Frescos y En Compost Generados En Un Cultivo De Crisantemo. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2007.

GANESH, Rangaraj; TORRIJOS, Michel y SOUSBIE, Philippe. Digestión anaerobia monofásico y de dos fases de frutas y residuos vegetales: Comparación de puesta en marcha, la estabilidad del reactor y el rendimiento del proceso. En: 2014. vol. 1, no. ELSEVIER.

GÓMEZ ROMERO, J., *et al.* Selective adaptation of an anaerobic microbial community: Biohydrogen production by co-digestion of cheese whey and vegetables fruit waste. En: [HTTP://linkinghub.ELSEVIER.com/retrieve/pii/S0360319914016917](http://linkinghub.ELSEVIER.com/retrieve/pii/S0360319914016917), 2014. Vol. 39,

GREENFIELD, H. y SOUTHGATE, D. A. T. Datos De Composición De Alimentos. FAO ed. Sidney, Australia: Elsevier Science Publishers, 2003. 321 p. ISBN 978-92-5-304949-3

GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto, *et al.* BIOGAS. Alternativa Ambiental En El Manejo De Residuos Para Su Uso Como Energético Sustentable. España: Academia Española, 2014. 145 p. ISBN 978-3-659-07190-4

HANSSON G., MOLIN N. End Product Inhibition in Methane Fermentation: Effects of Carbon Dioxide and Methane on Methenogenic Bacteria Utilizing Acetate. *European J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 1981. 236-247 p.

HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, Horacio Aldo. Diseño De Un Biodigestor Instrumentado Electrónicamente Para La Generación De Biogás En Casa Habitación. México.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.

HERNANDEZ, Evelyn, et al. Estudio sobre potencial de desarrollo de iniciativas de biogás a nivel productivo en honduras. Enero de 2012.p. 21-188

HILBERT, Jorge Antonio. Manual Para La Producción De Biogás. Argentina: Instituto De Ingeniera Rural, 2011.

HOLMAN, J. P. Transferencia De Calor. 1999. 621 p. ISBN 9682606497

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICA Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El Instituto, 1998.

_____.Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: El Instituto, 2008.

_____.Referencias documentales para fuentes de información electrónica. NTC 4490. Bogotá: El Instituto, 1998.

JARAMILLO HENAO, Gladys y ZAPATA MARTINEZ, Liliana María. Aprovechamiento De Los Residuos Sólidos Orgánicos En Colombia. Colombia.: 2008.

KIELY, Gerard. Ingeniería Ambiental: Fundamentos, Entornos, Tecnologías, y Sistemas De Gestión. McGraw-Hill, 1999. ISBN 41-481-2149-X

LEMMER, A., et al. Influence of different substrates on the performance of a two-stage high pressure anaerobic digestion system. En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. 2, 2015.vol. 178, p. 313-318

LINDNER, Jonas, et al. Is the continuous two-stage anaerobic digestion process well suited for all substrates? En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. 1,2016. vol. 200, p. 470-476

LÓPEZ MARTINEZ, Germán. Método No Convencional De Medición De Gases En La Digestión Anaerobia, 2004. p. 1-16

LTDA, CONSORCIO NAM y LTDA, VELZEA. Gestión De Los Residuos Orgánicos En Las Plazas De Mercado De Bogotá. 2008. 2-10 p.

MANDUJANO SÁNCHEZ, Porfirio. Digestión Anaerobia De Solidos En Alta Concentración. España, Madrid.: Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

MANZANILLA LÓPEZ, Rosa y MARBÁN MENDOZA, Nahúm. Aspectos Biológicos De La Estabilización Aeróbica II. Mundi Prensa Libros, 2012. ISBN 9788484765677

MARTÍ ORTEGA, Nuria. Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process. En: [Anónimo] Estudio Del Proceso De Digestión Anaerobia Para Optimizar La Recuperación De Fosforo En EDAR's. Boca Ratón, Florida: Copyright, 2006. ISBN 1-58112-332-9

MINISTERIO DE ENERGÍAS, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Global Environment Facility. Manual De Biogás. Santiago de Chile: 2011. 119 p. ISBN 978-95-306892

MIRAVETE, Antonio. Los Nuevos Materiales En La Construcción. Reverte ed. 1995. 394 p. ISBN 9788460508236

MOSQUERA CALLE, Jhon Mario; MARTINEZ MARTINEZ, Beatriz Elena y BUENO LOPÉZ, Liliana. Evaluación De La Digestión Anaerobia Como Alternativa De Estabilización De Biosolidos Producidos En La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales De La Universidad Tecnológica De Pereira. Colombia.: Universidad Tecnológica de Pereira, 2012. p. 47-57.

MOTT, Robert L. Mecánica De Fluidos. México: Pearson Educación, 2006. ISBN 9702608058

ORTEGA VALBUENA, Paola Margarita; PULIDO VALERO, Julieth Andrea y SIERRA SARMIENTO, Mauricio Aníbal. Desarrollo De Un Montaje Por Etapas a Nivel Banco Para La Obtención De Biogás a Partir De Residuos Vegetales. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América, 2014.

PEÑA MARTÍN, Gonzalo, et al. Tabla de composición de alimentos, 2014. Vol. 1, p. 26.

SCANO, Efisio Antonio, et al. Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. En: ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT. 2014.1. vol. 77, p. 22-30

SEN, Fei, et al. Performances of anaerobic co-digestion of fruit & vegetable waste (FVW) and food waste (FW): Single-phase vs. two-phase. En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. 9, 2013.vol. 144, p. 80-85

SILVA VINASCO, Juan Pablo. TECNOLOGÍA DEL BIOGAS, Universidad del Valle, 2008.

UNIVERSO PORCINO. Beneficios En El Uso De Biodigestores. [Electronic (1)]. Disponible en: http://www.aacporcinos.com.ar/articulos/internacionales_porcinas_01-2011_beneficios_en_el_uso_de_biodigestores.html

UPME, Unidad de Planeación Minero Energética. Guía Para La Implementación De Sistemas De Producción De Biogás. [Print (0)]:01ª ed. Bogotá D.C: 2003.

VEREDA ALONSO, C.; GÓMEZ LAHOZ, F. y RODRIGUEZ MAROTO, J, M. Producción de biogás a partir de residuos vegetales. En: UNIVERSIDAD DE MALAGA, 2006.Vol. 1.

VIVES DE ANDREI y José benito. Manual De Técnicas Analíticas Para La Determinación De Parámetros Físicoquímicos y Contaminantes Marinos: Aguas, Sedimentos y Organismos. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras ed. 2007. 148-30-34 p. ISBN 9789589726457

YANG, Lili Huang, et al. Enhancing biogas generation performance from food wastes by high-solids thermophilic anaerobic digestion: Effect of pH adjustment. En: [HTTP://linkinghub.ELSEVIER.com/retrieve/pii/S0964830515300846](http://linkinghub.ELSEVIER.com/retrieve/pii/S0964830515300846),2015. vol. 105, no. International Biodeterioration & Biodegradation, p. 153-159

ANEXOS

**ANEXO A.
CONTROL DE pH**

Tabla 26 Cambios de pH durante el tiempo de retención

Tiempo de retención (días)	pH FRUTAS	pH VERDURAS	pH MEZCLA CONTROL
0	6,95	7,23	6,7
2	6,95	7,2	6,7
4	6,93	7,2	6,7
6	6,93	7,17	6,64
8	6,91	7,07	6,64
10	6,87	6,96	6,62
12	6,8	6,9	6,58
14	6,72	6,78	6,57
16	6,6	6,69	6,53
18	6,52	6,62	6,56
20	6,45	6,57	6,23
22	6,28	6,51	6,21
24	6,17	6,49	6,2
26	6	6,48	6,2
28	5,96	6,44	6,3
30	5,88	6,3	6,24
32	5,84	6,25	6,25
34	5,8	6	6,23
36	5,58	5,92	6,4
38	5,53	5,84	6,49
40	5,52	5,7	6,72
42	5,4	5,5	6,74
44	5,14	5,4	6,8
46	5	6	6,86
48	5,7	6,27	6,86
50	5,9	6,5	6,84
52	6,2	6,63	6,85
54	6,5	6,73	6,85
56	6,5	6,73	6,85
58	6,64	6,83	6,86
60	6,72	6,88	6,86
62	6,76	6,93	6,86
64	6,76	6,94	6,87
66	6,82	6,97	6,87
68	6,82	6,97	6,87

70	6,9	7	6,9
72	6,96	7	6,92
74	7	7	6,93
76	7	7	6,93

ANEXO B.

CONTROL DE TEMPERATURA

Tabla 27. Control de temperatura diaria para las tres mezclas durante el tiempo de retención.

tiempo de retención (días)	Temperatura (°C) vegetales	Temperatura (°C) frutas	Temperatura (°C) mezcla control
0	22,4	23,4	21,8
2	22,9	23,9	23,4
4	24	24,8	23,8
6	24,8	26	24,4
8	26,4	27,4	25,3
10	27,2	29,2	26,2
12	28,5	30,1	27,9
14	29,7	30,9	30,4
16	30,1	31,3	30,5
18	30,4	31,5	30,6
20	30,8	31,7	30,3
22	30,9	31,7	30,1
24	31,2	31,8	29,6
26	31,3	32,1	28,4
28	31,7	32,3	28,5
30	32,1	32,3	29,5
32	32,6	32,5	30,3
34	33,3	32,6	29,6
36	32,4	32,7	30
38	31,7	33,1	29,6
40	29,8	32,2	29,3
42	29	31,5	30,1
44	30,8	31,3	29,6
46	31,2	28,5	28,7
48	31,6	29,4	29,3
50	30,6	31,3	29,5
52	30,6	31,5	29,6
54	30,9	31,8	29,3
56	31,2	31,6	30
58	31,4	31,6	30,1
60	31,8	31,8	29,7
62	32,3	31,8	29,7

64	32,8	31,9	30
66	33	32,1	30,2
68	33,4	32,1	30,2
70	33,8	32,6	30,6
72	34,3	33	31,3
74	34,6	33,6	31,8
76	35	34	32,2

ANEXO C.

METODOLOGÍA ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS

Cuadro 2. Solidos totales

Fundamento	Su determinación se basa en una medición cuantitativa del incremento de peso que experimenta una cápsula previamente tarada tras la evaporación de una muestra y secado a peso constante a 103-105°C.
Equipos y materiales	<ul style="list-style-type: none">-cápsulas de evaporación adecuadas al volumen de la muestra- estufa- desecador- balanza analítica- agitador magnético- placa calefactora- probetas de diferentes volúmenes
Metodología	<p>Preparación de la cápsula de evaporación:</p> <ul style="list-style-type: none">- Encender la estufa a 103-105°C.- Introducir una cápsula limpia durante una hora.- Llevar la cápsula al desecador hasta que se vaya a emplear.- Pesarla inmediatamente antes de usar y registrar el dato (Peso A). <p>Determinación de sólidos totales:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Esperar que la muestra se encuentre a temperatura ambiente.2. Seleccionar el volumen de muestra de acuerdo al aspecto de la misma; habitualmente éste estará entre 25 y 100 mL, según la norma.3. Mezclar bien la muestra y depositar el volumen seleccionado en la cápsula de evaporación previamente tarada.4. Colocar la cápsula en una placa calefactora y evaporar la muestra hasta casi sequedad pero evitando ebullición y salpicaduras.4. Llevar la muestra evaporada a la estufa a 103-105°C por 1 hora. A criterio del analista, el secado puede extenderse hasta el día siguiente, cuando el tipo de muestra, haga suponer alto contenido de sales y se considere ausencia de

	<p>compuestos orgánicos que puedan perderse con un calentamiento prolongado.</p> <p>5. Enfriar la cápsula en el desecador.</p> <p>6. Pesarse rápidamente para evitar cambios en el peso por exposición al aire y/o degradación del residuo y registrar los datos.</p> <p>7. El peso finalmente obtenido será Peso B.</p>
Cálculos	<p>Ecuación 15</p> $\%ST = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$ <p>Donde:</p> <p>P_i: peso de la cápsula de evaporación vacía (en g)</p> <p>P_f: peso de la cápsula de evaporación + residuo seco (en g)</p>

Fuente. VIVES DE ANDREI y Jose benito. Manual De Técnicas Analíticas Para La Determinación De parámetros Físicoquímicos y Contaminantes Marinos, 2007⁸¹.

Cuadro 3. Sólidos volátiles

Fundamento	<p>Los sólidos fijos son el residuo de los sólidos totales, disueltos o suspendidos, después de llevar una muestra a sequedad durante un tiempo determinado a 550°C. La pérdida de peso por ignición son los sólidos volátiles.</p>
Equipos y materiales	<ul style="list-style-type: none"> -cápsulas de evaporación adecuadas al volumen de la muestra - estufa - desecador - balanza analítica - agitador magnético - placa calefactora - probetas de diferentes volúmenes - mufla
Metodología	<p>Las condiciones ambientales no son críticas para la realización de este ensayo.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Selección de la metodología: definir la fracción (totales, disueltos o suspendidos) sobre la cual quieren determinarse

⁸¹ VIVES DE ANDREI y Jose benito. Manual De Técnicas Analíticas Para La Determinación De parámetros Físicoquímicos y Contaminantes Marinos, Op.cit.,p 30-34

	<p>los sólidos volátiles.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Proceder para la preparación del filtro o la cápsula de evaporación, pero cambiando el calentamiento a 103 ó 180°C, por incineración en mufla a 550°C durante una hora. Guardar la cápsula o el filtro en desecador y pesar inmediatamente antes de utilizarlo (peso A). - Registrar el peso de la cápsula o el filtro más el residuo, una vez secado a 103 ó 180°C (peso B). - Incinerar el residuo obtenido a 550°C durante 15 minutos. - Dejar la cápsula o el filtro, según sea el caso, al aire hasta que disminuya algo su temperatura y luego depositarlo dentro del desecador hasta que alcance la temperatura ambiente. - Pesar el filtro o la cápsula y registrar los datos. - Repetir las etapas hasta que la diferencia con la pesada previa sea
<p>Cálculos</p>	<p>Ecuación 16</p> $\%SV = \frac{C - B}{C} * 100$ <p>Donde:</p> <p>B: Peso del filtro o la cápsula + residuo seco, antes de ignición (en mg)</p> <p>C: Peso del filtro o la cápsula + residuo seco, después de ignición (en g)</p>

Fuente. VIVES DE ANDREI y Jose benito. Manual De Técnicas Analíticas Para La Determinación De parámetros Físicoquímicos y Contaminantes Marinos, 2007⁸².

⁸² VIVES DE ANDREI y Jose benito. Manual De Técnicas Analíticas Para La Determinación De parámetros Físicoquímicos y Contaminantes Marinos, Op.cit.,p 30-34.

Cuadro 4. DQO

Fundamento	Recolectar la muestra en envases de vidrio o plástico, sin cámara de aire. Refrigerar a 4°C, mantener en la oscuridad. Si no se analiza inmediatamente luego de extraída la muestra, acidificar con ácido sulfúrico a Ph < 2 y refrigerar
Equipos y materiales	<p>-1 Espectrofotómetro o colorímetro, longitud de onda 600 nm. Con adaptador de celda (tubos de digestión) de 25 mm de diámetro.</p> <p>-Digestor: block de aluminio con huecos para alojar tubos de 25 mm de diámetro y que opere a 150 ± 2°C.</p> <p>-Tubos de digestión: tubos de borosilicato con tapa de rosca resistente al calor y contratapa de teflón, de 50 ml de capacidad y 25 mm de diámetro.</p> <p>-Matraces aforados de 1000 ml.</p> <p>- Pipetas aforadas de 1, 2, 3, 4, 5, 10 ml</p> <p>- Pipetas graduadas de 10 ml</p>
Metodología	<p>1. Solución de digestión:</p> <p>Agregar a 500 MI de agua destilada 10.216 g de dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) previamente secado a 103°C por 2 horas, 167 MI de H₂SO₄ concentrado, y 33.3 g de sulfato mercúrico (HgSO₄). Disolver, enfriar a temperatura ambiente y enrasar a 1000 MI.</p> <p>2. Solución de ácido sulfúrico:</p> <p>Agregar sulfato de plata (Ag₂SO₄) a ácido sulfúrico conc. En una relación de 5.5 g/kg de H₂SO₄. Esperar 1 o 2 días antes de usar esta solución para permitir la disolución completa del Ag₂SO.</p> <p>3. Solución estándar de ftalato ácido de potasio (KHP), 500 mg O₂/L:</p> <p>Secar ftalato ácido de potasio (KHP) hasta peso constante a 120°C. Disolver 425 mg en agua destilada y diluir a 1000 MI en matraz aforado. Conservar la solución refrigerada a 4°C. Agua destilada, libre de materia orgánica.</p>

PROCEDIMIENTO:

1 Curva de calibración:

- a) Pipetear en 7 tubos de digestión: 1, 2, 3, 4, 5, 8 y 10 MI de la solución estándar de KHP y completar un volumen final de 10 ml con agua destilada.

Estas soluciones corresponden a 50, 100, 150, 200, 250, 400, 500 mg O₂/L respectivamente.

- b) Hacer un blanco de reactivos, pipeteando 10 ml de agua destilada en un tubo de digestión.
- c) Agregar a cada tubo de digestión 6 ml de solución de digestión (7.1) y 14 ml de solución de ácido sulfúrico.
- d) Tapar bien los tubos de digestión y agitarlos vigorosamente. Colocar los tubos en el digestor a 150°C durante 2 horas. Enfriar los tubos a temperatura ambiente colocándolos en una gradilla. La gradilla debe ser adecuada para no deteriorar la calidad del vidrio de los tubos, los que se usan como celda en el espectrofotómetro.
- e) Invertir los tubos varias veces y esperar a que el sólido sedimente.
- f) Descartar los tubos de digestión cuya solución posea color verde. Leer la absorbancia a 600 nm.
- g) Graficar la absorbancia versus mg O₂ /L y trazar la mejor recta.

Hacer una curva de calibración por cada lote de reactivos preparados.

1. Determinación:

- a) Pipetear 10 MI de muestra o una dilución adecuada en un tubo de digestión.
- b) Seguir los pasos descritos en los numerales 8.1 c), d) y e).
- c) Leer la absorbancia a 600 nm.

Cálculos	Ecuación 17
	$\text{DQO, mg O}_2/\text{L} = C \times 10/T$ <p>Donde;</p> <p>C = mg O₂/L de la muestra leídos de la curva de calibración T = ml de muestra tomada para el ensayo Los resultados se expresan en mg de oxígeno consumido/L.</p>

Fuente. VIVES DE ANDREI y José Benito. Manual De Técnicas Analíticas Para La Determinación De Parámetros Fisicoquímicos y Contaminantes Marinos, 2007⁸³

⁸³ VIVES DE ANDREI y José Benito. Manual De Técnicas Analíticas Para La Determinación De Parámetros Fisicoquímicos y Contaminantes Marinos: Aguas, Sedimentos y Organismos. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras ed. 2007. P. 30,34

ANEXO D

REGÍSTRO FOTOGRAFICO Y CALCULOS ANALISIS FISICOQUÍMICOS

En la **Ilustración 19** se muestra el registro fotográfico del procedimiento para la determinación de los sólidos totales y volátiles en la **Ilustración 20**, este análisis se le realizo a las tres mezclas, para residuos de verduras, de frutas y para la mezcla de control, de acuerdo a la metodología expuesta en el **Cuadro 2** y **Cuadro 3** respectivamente.

Ilustración 19. Registro fotográfico para la determinación de solidos totales

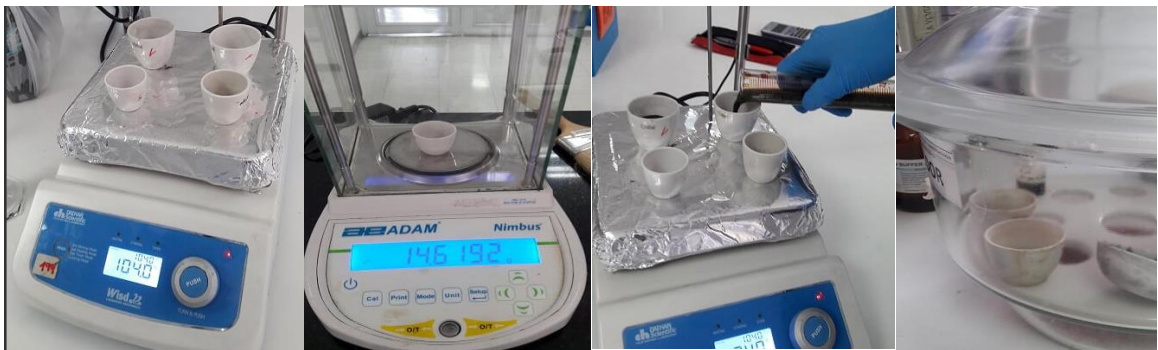


Ilustración 20. Registro fotográfico para la determinación de solidos volátiles.



Los cálculos para determinar los sólidos totales se muestran a continuación a partir de la **Ecuación 15**, y de acuerdo a los datos obtenidos como se observa en la **Tabla 28**.

Tabla 28. Datos recolectados en los análisis de solidos totales

Parámetro	Mezcla frutas	Mezcla verduras	Mezcla control
Peso de la capsula (g) + residuo seco	21,0670	14,6192	18,3312
Peso de la capsula (g)	20,2809	14,1473	17,6676

Para la mezcla de residuos de frutas:

$$\%ST = \frac{21,0670 - 20,2809}{21,0670} * 100 = 3,731\%$$

Para la mezcla de residuos de verduras:

$$\%ST = \frac{14,6192 - 14,1473}{14,6192} * 100 = 3,228\%$$

Para la mezcla de residuos de verduras:

$$\%ST = \frac{18,3312 - 17,6676}{18,3312} * 100 = 3,62\%$$

Para los sólidos volátiles a partir de la **Ecuación 16** y de acuerdo a los datos obtenidos como se observa en la **Tabla 29**, se muestran los cálculos a continuación:

Tabla 29. Datos recolectados en los análisis de solidos volátiles

Parámetro	Mezcla frutas	Mezcla verduras	Mezcla control
Peso (después de ignición) (g)	14,9142	29,3539	28,4461
Peso (antes de ignición) (g)	14,4799	28,7052	27,5643

Para la mezcla de residuos de frutas:

$$mg\ de\ \frac{SV}{L} = \frac{(14914,2 - 14479,9) * 1000}{25ml} = 17,37mg\ de\ SV/L$$

Para la mezcla de residuos de verduras:

$$mg\ de\ \frac{SV}{L} = \frac{(29353,9 - 28705,2) * 1000}{25ml} = 25,99mg\ de\ SV/L$$

Para la mezcla de residuos de verduras:

$$mg\ de\ \frac{SV}{L} = \frac{(28446\ 1 - 27564\ 3) * 1000}{25ml} = 35,27mg\ de\ SV/L$$

El registro fotográfico de la determinación de la demanda química de oxígeno se muestra en la **Ilustración 21**, en un matraz aforado de 1000ml, la muestra se oxida con dicromato de potasio, en medio ácido, y se realizó la curva de calibración en 7 tubos de digestión con las soluciones de ftalato de potasio y ácido sulfúrico se muestra en el **Cuadro 4**.

Ilustración 21. Registro fotográfico para la determinación de DQO.



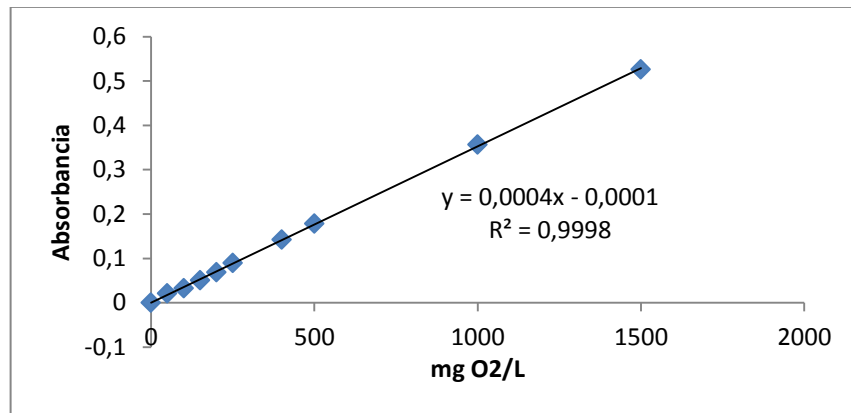
Se realiza el análisis de DQO realizando una curva de calibración la cual se muestra en la **Tabla 30**, esta es comparada con la absorbancia de las muestras obtenidas de los lodos con vegetales y de lodos con frutas las cuales fueron de 0.456 y 0.438 respectivamente.

Tabla 30 Curva de calibración DQO

mg/l O ₂	absorbancia
0	0
50	0.021
100	0.032
150	0.05
200	0.068
250	0.089
400	0.142
500	0.178
1000	0.356
1500	0.526

En la **Grafica 6**, se muestra la ecuación que mejor se ajustó a los datos obtenidos en la curva anteriormente descrita, la cual reporto un R^2 de 0,9998. Mediante esta ecuación se determina la concentración de O₂ disuelto en las muestra los cuales fueron de 1097,25 mg O₂/L para la muestra de lodos de vegetales y de 1142,25 mg O₂/L para la muestra de lodos con fruta, lo cual indica una mayor cantidad de oxígeno disuelto en la muestra de lodos con vegetales.


Grafica 6. mg O₂/L Vs Absorbancia



Utilizando la **Ecuación 17** se demuestra la demanda química de oxígeno (DQO), la cual arrojo valores de 1097,25 mg/L para la muestra de lodos con vegetales y de 1142,25 mg/L para la muestra de lodos con fruta.

ANEXO E

CROMATOGRAFIA DE GASES

 <small>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA Y AMBIENTAL LABORATORIO DE INGENIERIA QUIMICA</small>	INFORME DE ENSAYO	Código: FA006001 Versión: 01 Vigencia: 16/07/2012 Página 1 de 2
---	--------------------------	--

Consecutivo No. 072- 2016
Fecha 2016-10-7

Empresa	Fundación Universidad de América		
Nombre	Juan Daniel Gómez Franco		
Dirección	Av. Circunvalar No. 1 - 53	3376680	3112487575
Correo electrónico	Juan.gomez@estudiantes.uamerica.edu.co		

Ensayo	Cromatografía de gases
Orden de trabajo	LQUI - 072- 2016

Muestra	
Consecutivo	LQUI -072 - 2016
Fecha de recepción	6/10/ 2016
Cantidad	3 muestras

Ejecución del ensayo	
Fecha inicio	07/10/2016
Fecha fin	07/10/ 2016

1. MÉTODO DE ENSAYO

Análisis de metano por cromatografía gaseosa

2. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra No.	Descripción	Observaciones iniciales
1	Mezcla blanco del proceso, estéril y agua	Ninguna
2	Mezcla de residuos de frutas	Ninguna
3	Mezcla de residuos de vegetales	Ninguna

NOTA: Los resultados presentados a continuación corresponden a las muestras entregadas al laboratorio por el cliente.

3. DATOS DEL ENSAYO

Equipo	Cromatógrafo Hp 5890
Detector	TCD. Temperatura 150 °C
Inyector	Temperatura 100°C
Columna	Malla molecular 5 ^ª

4. RESULTADOS

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	%vol. Metano		%vol. Metano		%vol. Metano
1-1	63,2	2-1	67,5	3-1	70,6
1-2	64,6	2-2	67,8	3-2	68,9
1-3	64,5	2-3	67,7	3-3	69,1
Promedio	64,1	Promedio	67,7	Promedio	69,5



Ing. LUIS FERNANDO CORDOBA C.

Carrera 30 No. 45-03, LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA, Edificio 412, Oficina 212
 Teléfono: (57-1) 316 5672 Fax: 316 5617 Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 14301 Fax: 14302
 Correo electrónico: labiq_fqpg@unal.edu.co
 Bogotá, Colombia, Sur América

ANEXO F.
DISEÑO DE EXPERIMENTOS

- VARIACIÓN TOTAL RESPECTO A LA MEDIA GENERAL

$$SCT = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c (X_{ij} - \bar{X})^2$$

- EFECTO DE LA MEDIA DE CADA TRATAMIENTO RESPECTO A LA MEDIA GENERAL.

$$SCTR = \sum_{j=1}^c r_j (\bar{X}_j - \bar{X})^2$$

- VARIACIÓN DENTRO DEL TRATAMIENTO O VARIACIÓN DEL ERROR, CADA VALOR RESPECTO A LA MEDIA DE SU TRATAMIENTO

$$SCE = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c (X_{ij} - \bar{X}_j)^2$$

Tabla Anova.

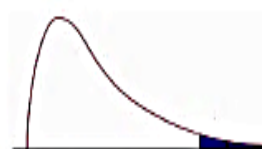
Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	F
Entre Grupos	GLE=K-1	$SCE = \sum n_i (X_i - \bar{X})^2$	CME= SCE/GLE	CME/CMI
Intra Grupos	GLI=N-K Ó GLT-GLE	$SCI = \sum \sum (X_{ij} - \bar{X}_i)^2$ Ó SCT-SCE	CMI= SCI/GLI	
TOTAL	GLT=N -1	$SCT = \sum \sum (X_{ij} - \bar{X})^2$		

Distribución F 0.05

En las columnas se encuentran los valores F que corresponden al área 0.05 a la derecha

En las columnas se encuentran los grados de libertad del numerador

En los renglones se encuentran los grados de libertad del denominador.




	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	24	30	40	60	120
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.0	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.28	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.26	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.24	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.22	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.20	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.18	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.17	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.15	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.14	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.13	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.04	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.95	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.87	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35

Para calcular el valor F en excel, se utiliza la función de la distribución F inversa

=distr.f.inv(0.05; gl num; gl den)

© Ing. Jesús Alberto Mellado Bosque


 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES

Nosotros **Angie Mariana García Rodríguez** y **Juan Daniel Gómez Franco** en calidad de titulares de la obra **Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia**, elaborada en el año **2016**, autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.

	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autores establecemos las siguientes condiciones de uso de nuestra obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:



Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.



Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.



Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.

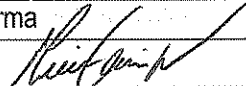
Licencias completas: http://cc.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá D.C, a los 05 días del mes de Noviembre del año 2016.

LOS AUTORES:

Autor 1

Nombres	Apellidos
Angie Mariana	García Rodríguez
Documento de identificación No	Firma
1072750052	

Autor 2

Nombres	Apellidos
Juan Daniel	Gómez Franco
Documento de identificación No	Firma
1075874879	