

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA PARA LA MEJORA DE UN MODELO DE
BIODIGESTOR ANAEROBIO CONVENCIONAL A ESCALA BANCO A PARTIR
DE UNA MEZCLA DE RESIDUOS BOVINOS Y LODOS EN LA FINCA EL
RECODO DE TABIO, CUNDINAMARCA

DANIELA BERNAL VÉLEZ
DANIELA QUINTERO GARZÓN

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D. C.
2016

DESARROLLO DE UNA PROPUESTA PARA LA MEJORA DE UN MODELO DE
BIODIGESTOR ANAEROBIO CONVENCIONAL A ESCALA BANCO A PARTIR
DE UNA MEZCLA DE RESIDUOS BOVINOS Y LODOS EN LA FINCA EL
RECODO DE TABIO, CUNDINAMARCA

DANIELA BERNAL VÉLEZ
DANIELA QUINTERO GARZÓN

Proyecto integrado para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO

Directora. ANDREA LACHE MUÑOZ
MSc. Ingeniería Química

Codirectora. ADRIANA INÉS PÁEZ MORALES
Microbióloga Industrial.

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D. C.
2016

Nota de Aceptación (Director de Investigaciones)

Firma Docente Investigador

Firma Docente Jurado 1

Firma Docente Jurado 2

Bogotá, D. C., Septiembre 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 Postgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano de la Facultad de Ingenierías

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director de investigaciones

Ing. ARMANDO FERNANDEZ CÁRDENAS

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

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

Dedicamos este trabajo a Dios por darnos vida, fuerza y voluntad para seguir adelante con todos nuestros obstáculos, a nuestros padres que siempre nos guiaron por el buen camino y quienes nos brindaron su apoyo incondicional durante nuestra carrera profesional.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco principalmente a Dios por haberme guiado hasta donde hoy estoy, por haberme dado la vida y la posibilidad de tener una hermosa familia que siempre me ha soportado y apoyado durante toda mi carrera.

Daniela Quintero.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por brindarme la oportunidad de obtener un logro más en mi vida, por darme vida, salud, sabiduría y fortaleza para superar los obstáculos que se me presentaron.

A mis padres Fernando Bernal y Marina Vélez, por su dedicación y apoyo incondicional, por sus motivaciones diarias para continuar luchando para lograr esta meta, por guiarme siempre por el mejor camino, son para mí la base fundamental de mi vida; y por sus esfuerzos económicos durante toda mi carrera profesional. También a mis hermanas Ángela y Jessica por sus consejos, apoyo y cariño; y familiares cercanos que acompañan y comparten mis logros.

A la Universidad de América por darme la posibilidad de pertenecer como una de sus estudiantes y abrirme las puertas para estudiar la carrera de Ingeniería Química.

Agradezco también a mi directora Andrea Lache y codirectora Adriana Páez, por su acompañamiento y asesoría durante este proceso, por compartir sus conocimientos, gracias por sus aportes y continua colaboración.

A mi compañera de estudios Daniela Quintero, por su compañerismo y dedicación durante el desarrollo del proyecto.

A mi compañero, amigo y novio Alex Torres, por estar siempre a mi lado en todo momento, por su apoyo y compañía, gracias por aportarle un alto porcentaje a mis ganas de seguir adelante con mis metas.

En nombre de mi compañera y el mío, agradecemos al señor Alfonso Castro, por permitirnos trabajar en su finca y a sus trabajadores por colaborarnos cordialmente cuando fue necesario.

Finalmente, agradezco a todas las personas partícipes durante el desarrollo de este proyecto de grado.

Daniela Bernal.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
OBJETIVOS	22
1. GENERALIDADES	23
1.1 BIOMASA	23
1.1.1 Biomasa residual	23
1.1.2 Procesos bioquímicos de transformación de la biomasa	23
1.2 DIGESTIÓN	25
1.2.1 Digestión anaerobia	25
1.2.2 Factores que intervienen	26
1.2.3 Productos obtenidos	28
1.3 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	28
1.3.1 Efluentes	28
1.4 DIGESTORES	29
1.4.1 Cálculos de un reactor anaerobio de flujo ascendente UASB	31
1.5 ESTIÉRCOL DE VACA	33
1.5.1 Cantidad de estiércol producido	33
1.5.2 Composición química	33
1.5.3 Composición física	35
1.5.4 Pérdida de nutrientes	35
1.5.5 Contaminación causada	36
1.6 DESCRIPCIÓN DE LA FINCA EL RECODO	36
1.6.1 Consumo de gas y energía mensual en la finca	36
2. METODOLOGÍA	38
2.1 ESTABLECER LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA LOS SISTEMAS DE DIGESTIÓN	38
2.1.1 Temperatura	38
2.1.2 pH	38
2.1.3 Tiempo de retención hidráulico	39
2.1.4 Caudal de entrada del afluente	39
2.1.5 Volumen de materia orgánica	39
2.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	40
2.2.1 Material y forma de los digestores	40
2.2.2 Dimensiones de los digestores de flujo ascendente	40
2.2.3 Alternativa para la mejora del nuevo prototipo	41
2.2.4 Selección del tipo de almacenamiento para el biogás	43
2.2.5 Selección y acondicionamiento de la instrumentación de entradas y salidas	43
2.2.6 Volumen de Biogás esperado	46

2.3	EVALUACION DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LOS DOS BIODIGESTORES	46
2.3.1	Puesta en marcha de los digestores	46
2.3.2	Parámetros de evaluación	47
2.3.3	Análisis de laboratorio	47
2.4	COMPARACION DE LAS VARIABLES TIEMPO Y PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIO PARA LOS DOS BIODIGESTORES	48
2.4.1	Análisis físicos	48
2.4.2	Análisis estadísticos.	48
3.	RESULTADOS	49
3.1	CONDICIONES DE OPERACIÓN	49
3.1.1	Temperatura	49
3.1.2	pH	51
3.1.3	Tiempo de retención hidráulica	54
3.1.4	Caudal de entrada del efluente	54
3.1.5	Volumen de materia orgánica	54
3.2	CONSTRUCCIÓN DE LOS DIGESTORES	55
3.2.1	Material y forma	55
3.2.2	Dimensiones de los digestores de flujo ascendente	55
3.2.3	Alternativa para la mejora del nuevo prototipo	56
3.2.4	Selección del tipo de almacenamiento para el biogás	57
3.2.5	Selección y acondicionamiento de la instrumentación de las entradas y salidas	57
3.2.6	Volumen de biogás esperado	58
3.3	EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	58
3.3.1	Evaluación de la carga microbiológica	58
3.3.2	Evaluación de la actividad enzimática de los microorganismos presentes en los digestores	59
3.3.3	Nutrientes y relación C/N	61
3.3.4	DQO	61
3.3.5	Sólidos suspendidos, volátiles y totales	62
3.3.6	Cantidad de biogás generado	63
3.4	COMPARACIÓN DE LAS VARIABLES TIEMPO Y PRODUCCIÓN	63
3.4.1	Análisis físicos	63
3.4.2	Análisis estadísticos	64
4.	INGENIERÍA BÁSICA PARA LA FINCA EL RECODO	68
4.1	ETAPAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN.	68
4.1.1	Recepción y almacenamiento de la materia prima	68
4.1.2	Acondicionamiento de los desechos orgánicos	68
4.1.3	Fermentación anaerobia	68
4.1.4	Cantidad de desechos generados en la finca	69
4.1.5	Dimensionamiento del volumen del digestor UASB	69

4.1.6	Volumen de biogás esperado	71
4.1.7	Equipos y accesorios para la implementación de la planta de biogás	72
4.1.8	Alternativa térmica para la finca El Recodo	73
4.1.9	Impacto ambiental del proceso de digestión	74
4.1.10	Riesgos de seguridad asociados al proceso	74
5.	CONCLUSIONES	76
6.	RECOMENDACIONES	78
	BIBLIOGRAFÍA	79
	ANEXOS	85

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición bioquímica de la materia prima	26
Tabla 2. Composición química en % del estiércol de vaca con un pH 7.1	34
Tabla 3. Matriz de selección para la mejora del digestor nuevo prototipo	42
Tabla 4. Factor promedio para la producción de biogás	46
Tabla 5. Parámetros de evaluación con sus respectivos instrumentos de medición	47
Tabla 6. Comparación de la temperatura interna y ambiental a las 5:00AM	51
Tabla 7. Capacidades de los tanques en el mercado	54
Tabla 8. Características de los aislantes térmicos	56
Tabla 9. Resultados de nutrientes y relación carbono nitrógeno para el sustrato inicial	61
Tabla 10. Resultados de sólidos para el digestor 1	63
Tabla 11. Resultados de sólidos para el digestor 2	63
Tabla 12. Resultados cromatografía de gases para cada digestor.	64
Tabla 13. Datos tomados para realizar el Anova	64
Tabla 14. Resultados de ANOVA para Temperatura, pH, DQO y sólidos totales	66
Tabla 15. Factor promedio para la producción de biogás a partir de estiércol vacuno	71
Tabla 16. Accesorios, tuberías y válvulas necesarios para la construcción del reactor de la finca El Recodo	72
Tabla 17. Poder calorífico del propano y el biogás	73

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Temperatura ambiente 11:00AM	49
Gráfica 2. Temperatura interna de los digestores a las 11:00AM	50
Gráfica 3. Comportamiento del pH en los digestores	53
Gráfica 4. Comportamiento de la DQO en los digestores	62

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Procesos bioquímicos de transformación de la biomasa.	24
Figura 2. Esquema general de un reactor U.A.S.B.	30
Figura 3. Transformación de carbohidratos a estiércol.	34
Figura 4. Transformación de lípidos a estiércol.	35
Figura 5. Diagrama de proceso del sistema convencional.	45
Figura 6. Diagrama de proceso con sistema de estabilización de temperatura.	45
Figura 7. Diagrama de bloques del proceso de producción de biogás a partir de estiércol bovino.	69

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Tipos de digestores	29
Ilustración 2. Finca El Recodo	37
Ilustración 3. Análisis de parámetros que afectan el proceso	41
Ilustración 4. Análisis de parámetros físicos	42
Ilustración 5. Estiércol fresco	51
Ilustración 6. Estiércol seco	52
Ilustración 7. Gasómetros utilizados para almacenar el biogás	57
Ilustración 8. Construcción finalizada de los digestores	58
Ilustración 9. Resultado de la coloración Gram para los cultivos BHI, Carboximetil y almidón respectivamente	59
Ilustración 10. Resultado para los medios de cultivo con celulosa, leche y almidón respectivamente	60
Ilustración 11. Resultado para el medio de cultivo lignina	60
Ilustración 12. Hipótesis planteadas	65
Ilustración 13. Resultados gráficos del Anova para temperatura (1), pH (2), DQO (3) y solidos (4)	67

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Volumen del reactor	31
Ecuación 2. Área del reactor	31
Ecuación 3. Altura efectiva del reactor	31
Ecuación 4. Flujo másico. Este se expresa en Kg DQO/día	31
Ecuación 5. Carga hidráulica	32
Ecuación 6. Velocidad de flujo en la campana	32
Ecuación 7. Área de la cobertura	32
Ecuación 8. Área de la sección transversal de la campana	32
Ecuación 9. Radio mayor de la campana	32
Ecuación 10. Ancho de la abertura	32
Ecuación 11. Altura de la campana	33
Ecuación 12. Tiempo de retención hidráulico	39
Ecuación 13. Caudal de entrada del afluente	39
Ecuación 14. Volumen del líquido	40
Ecuación 15. Volumen de estiércol	40
Ecuación 16. Volumen de biogás total esperado	46
Ecuación 17. Caudal de entrada del efluente	54
Ecuación 18. Volumen de materia orgánica	55
Ecuación 19. Área del reactor	55
Ecuación 20. Carga hidráulica	56
Ecuación 21. Flujo másico	56

Ecuación 22. Velocidad de flujo en la campana	56
Ecuación 23. Cantidad de estiércol generado en la finca	69
Ecuación 24. Carga de alimentación	69
Ecuación 25. Volumen total de la mezcla	70
Ecuación 26. Diámetro y altura del digestor	70
Ecuación 27. Altura del reactor	70
Ecuación 28. Flujo másico	70
Ecuación 29. Carga hidráulica	71
Ecuación 30. Volumen de biogás esperado en la finca	71
Ecuación 31. Energía consumida de propano	73
Ecuación 32. Volumen de biogás consumido en la finca	74

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Instrumentos de medición	86
Anexo B. Procedimiento de construcción de los digestores	88
Anexo C. Instrumentos y materiales para la construcción de los sistemas de digestión	91
Anexo D. Procedimiento del proceso de digestión	92
Anexo E. Resultados pruebas de laboratorio	93
Anexo F. Especificaciones de la demanda química de oxígeno	98
Anexo G. Registros de temperatura ambiental	103
Anexo H. Registros de temperatura interna de los digestores	105
Anexo I. Datos de pH para los digestores	106
Anexo J. Procedimiento de coloración de gram	107
Anexo K. Resultados de cromatografía de gases	108
Anexo I. Procedimiento para realizar el Anova	110

GLOSARIO

ABONO ORGÁNICO: los abonos orgánicos son generalmente de origen animal o vegetal. Son típicamente desechos industriales como de matadero, pero interesantes por su aporte de nitrógeno de descomposición relativamente lenta y por su acción favorecedora de la multiplicación rápida de la microflora.

BIOGÁS: es la mezcla de gas producido por bacterias metanogénicas que transforman material biodegradable en condiciones anaerobias. Está compuesto de 60% – 80% metano, 30% – 40% dióxido de carbono y trazas de otros gases.

COMPOSTAJE: proceso biológico anaerobio mediante el cual los microorganismos actúan sobre la materia biodegradable rápidamente, permitiendo obtener “compost” el cual constituye un nutriente para el suelo que mejora la estructura y ayuda a reducir la erosión.

DQO: prueba química en aguas residuales que mide la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar toda la materia orgánica y oxidable presente en el agua residual. Sigla de demanda química de oxígeno.

ESTIÉRCOL: heces fecales de los seres vivos. En general, el estiércol posee un contenido de sólidos del 8% al 25% dependiendo del tipo del ser vivo.

FERMENTACIÓN MESOFÍLICA: digestión anaerobia que se realiza a temperaturas entre 20°C y 45°C. La carga debe permanecer en el digester de 15 a 30 días. Este proceso tiende a ser más confiable y tolerante que el proceso termofílico.

METANO: hidrocarburo alcano más sencillo, es gas. Su fórmula química es CH₄ y hace parte de la composición del biogás, resultado de la digestión anaerobia.

SÓLIDOS TOTALES: se expresa en porcentaje, hace referencia a la fracción del peso total de los sólidos orgánicos en la mezcla acuosa.

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES: son la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103°C – 105°C hasta alcanzar un peso constante.

SÓLIDOS VOLÁTILES TOTALES: fracción orgánica de los sólidos que se volatilizan a temperaturas de 550°C.

TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA: lapso de días durante el cual la carga alimentada permanece en el digester y es el tiempo necesario para la digestión del material orgánico a la temperatura de operación del digester.

RESUMEN

La generación de energía a partir de fuentes consideradas limpias está en auge en la actualidad, debido a que el consumo y explotación de combustibles fósiles es una de las principales causas de la contaminación a la que se enfrenta nuestro planeta tierra, por lo tanto, el presente trabajo está enfocado en establecer mejoras al sistema de digestión anaerobio convencional haciendo uso de los desechos producidos por el ganado bovino en la finca El Recodo, para generar biogás aumentando su eficiencia de producción y/o mejorando el tiempo de operación con la finalidad de favorecer los predios ganaderos para que puedan generar energías, contribuyendo en disminuir la contaminación ambiental y eventualmente gastos económicos.

En consecuencia, inicialmente se establecieron las condiciones de operación para el sistema convencional y el nuevo prototipo, las cuales son temperatura, pH, caudal de entrada del afluente y cantidad de materia orgánica. Se realizaron pruebas de laboratorio al estiércol como relación C/N, DQO, fósforo, nitrógeno, sólidos totales, suspendidos y volátiles, resultados que permitieron comparar el sustrato al inicio y al final del proceso.

Se realizó la construcción de dos sistemas de digestión teniendo en cuenta las mejoras propuestas para el nuevo prototipo. Finalmente, se evaluó la producción de biogás por medio de una cromatografía de gases permitiendo conocer la composición del biogás generado por cada sistema para compararlos y concluir con un análisis en cuanto a cantidad obtenida y/o tiempo de operación.

PALABRAS CLAVE. Biogás, estiércol bovino, energía alternativa, desechos orgánicos.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de reducir emisiones de gases de efecto invernadero especialmente dióxido de carbono (CO₂) y la creciente necesidad de implementar alternativas para producción de energía limpia, genera como resultado una compensación económica y ambiental para el planeta. Las energías renovables contribuyen a la reducción del uso de combustibles fósiles y fuentes no renovables, que día a día se agotan y generan mayor contaminación en el medio ambiente.

La digestión anaerobia de residuos agrícolas es una de las alternativas para reducir la contaminación que pueden causar este tipo de residuos, como por ejemplo cambios climáticos. De una parte, millones de toneladas de residuos agrícolas se generan anualmente y por otra, estudios revelan la eficiencia, calidad y cantidad de biogás que se puede generar al hacer uso de los residuos agrícolas. Estos residuos son recursos que se encuentran disponibles en todo el mundo y su digestión permite hidrolizarlos y fermentarlos por medio de bacterias acidogénicas dentro de ácidos grasos volátiles, que son después consumidos por bacterias metanogénicas y convertidos en gas metano, que posteriormente se puede transformar en fuente de energías alternativas, como la eléctrica o la térmica, entre otras¹.

El presente trabajo considera la digestión anaerobia a partir de residuos bovinos, mediante la comparación entre dos digestores, uno de ellos convencional y de acuerdo a la información de la literatura, se plantea una mejora en el nuevo prototipo a escala banco permitiendo el análisis de producción de biogás en cada uno de ellos.

¹ PARRA. O, Brayan; TORRES. L, Patricia; MARMOLEJO. R, Luis Fernando; CÁRDENAS, Lina Marcela; VÁSQUEZ, Carlos; TORRES, Wilmar; OROÑEZ José. Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. U.D.C.A. Colombia. 2014.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta para la mejora de un modelo de digestor anaerobio convencional a escala banco a partir de una mezcla de residuos bovinos y lodos en la finca El Recodo de Tabio, Cundinamarca.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las condiciones de operación para el sistema de digestión anaerobio convencional como para el nuevo prototipo.
- Construir el digestor anaerobio convencional y el nuevo prototipo a escala banco.
- Evaluar la producción de biogás en cada uno de los dos digestores.
- Comparar las variables tiempo y producción de biogás del proceso de digestión anaerobio para cada digestor.

1. GENERALIDADES

El proceso de digestión comprende la actividad metabólica microbiana como principal fundamento de su funcionamiento. Para realizar las mejoras al sistema de digestión convencional en donde se utilicen residuos bovinos se deben tener en cuenta definiciones y conceptos claves que permiten entender el mecanismo de este proceso como lo es la biomasa.

1.1 BIOMASA

La biomasa es materia viva presente en una capa muy fina y pequeña de la superficie terrestre llamada biosfera. La biomasa puede ser subdividida en residual húmeda y seca. Como biomasa húmeda se encuentran los materiales que contienen menos de 10% de sustancia seca provenientes del tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales y del estiércol de porcino y vacuno; por otro lado la biomasa seca se clasifica según el sector productivo que la emite, dentro del cual puede estar residuos forestales de la industria maderera, residuos agroindustriales de la producción de alimentos, desechos de plantaciones, desechos de poda y maleza, beneficio de ganado, residuos sólidos urbanos y estiércol avícola. Se considera que la biomasa es renovable ya que hace parte del ciclo natural y repetitivo de la naturaleza^{2,3,4}.

La biomasa está formada principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno, compuestos responsables del contenido energético de la biomasa.

1.1.1 Biomasa residual. Es un recurso muy variado debido a su producción y origen en los sistemas terrestres y acuáticos, se puede utilizar como fuente energética. Esta biomasa abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracterizan por su heterogeneidad, origen y naturaleza; igualmente los residuos que se generan a partir de transformaciones naturales o artificiales de la materia viva hacen parte de la biomasa⁵.

El estiércol constituye una fuente importante de biomasa residual, de acuerdo a esto, para el sistema de digestión en el que se trabajará, se usará biomasa del sector pecuario, específicamente estiércol de vaca, el cual se describirá más adelante.

1.1.2 Procesos bioquímicos de transformación de la biomasa. La transformación de la biomasa con fines energéticos genera biocombustibles y biogás a partir de

² FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 154 Roma. 2008. Página 2-4.

³ PARÉZ R; JUÁREZ A. Bioquímica de los microorganismos. Ed Reverte. Página 324.

⁴ UPME. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Colombia. 2008. Página 118.

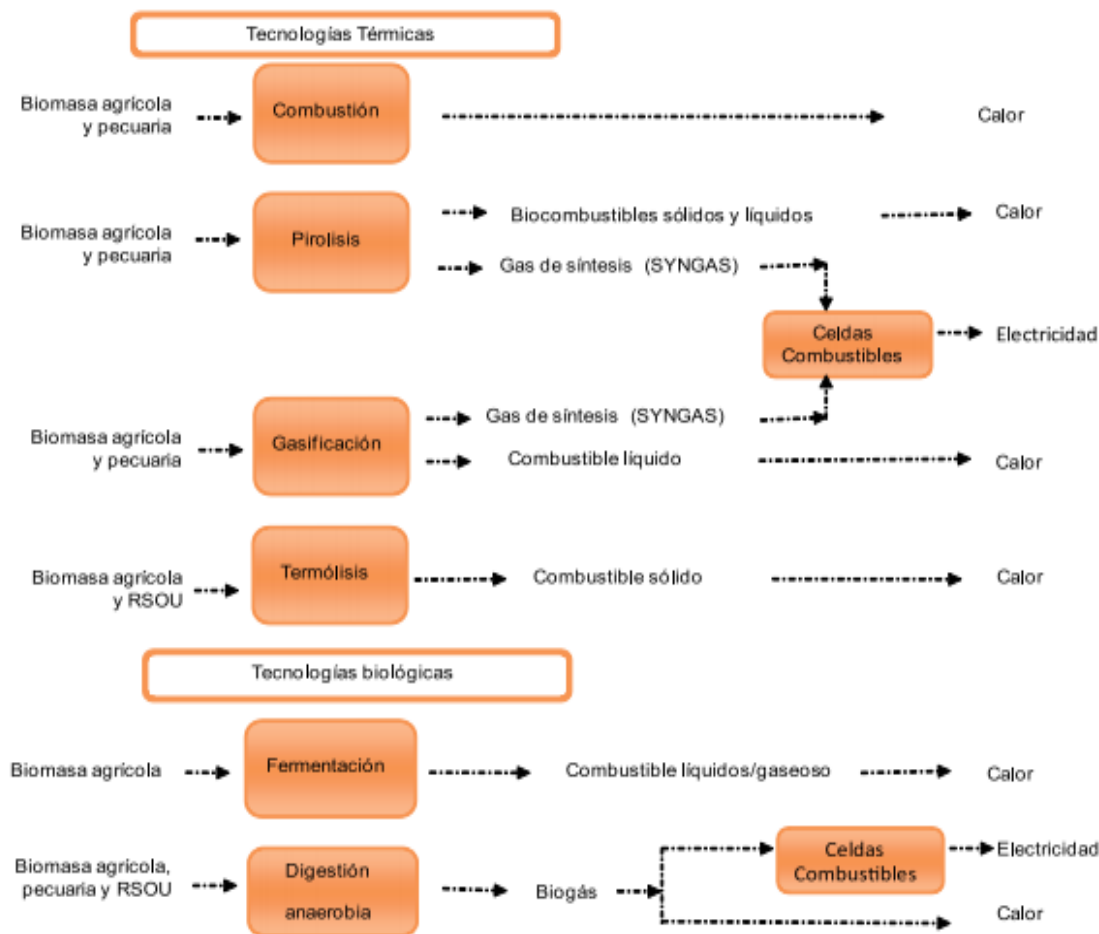
⁵ Lbid., página 121.

los cuales se puede obtener calor, electricidad o fuerza motriz⁶.

El aprovechamiento de la biomasa seca por medio de procesos termoquímicos depende de factores como el contenido de humedad, capacidad calorífica, concentración de carbono fijo y volátil, contenido de cenizas y de los metales alcalinos presentes. Por otra parte la humedad es un factor determinante para procesos de bio-conversión así como la relación de celulosa y lignina⁷.

Las principales fuentes de transformación energética de la biomasa son la combustión, pirólisis, gasificación, termólisis, fermentación y digestión anaerobia que se presentan detalladamente en la figura 1.

Figura 1. Procesos bioquímicos de transformación de la biomasa.



Fuente. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. 2008.

⁶ Lbid., página 125.

⁷ Lbid., página 125.

1.2 DIGESTIÓN

Es el proceso de transformación de materia orgánica que ocurre en un contenedor llamado digestor, en el que se degradan los residuos orgánicos debido a la intervención de población microbiana en presencia o ausencia de oxígeno, con el fin de obtener una fuente de energía renovable llamada biogás⁸.

El proceso de digestión se puede llevar a cabo de manera aerobia y anaerobia, en este caso se decidió realizar la digestión anaerobia, definiéndose como:

1.2.1 Digestión anaerobia. Es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano en ausencia de oxígeno⁹.

Se caracteriza por la existencia de tres fases diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato en el cual intervienen diversas poblaciones de bacterias que son las siguientes:

- Etapa hidrolítica. Etapa en la que se realiza la hidrólisis de partículas y moléculas complejas como proteínas, carbohidratos y lípidos por medio de enzimas producidas por microorganismos hidrolíticos, ya que la materia orgánica no puede ser utilizada por los microorganismos hasta que estos no hidrolizan compuestos solubles que puedan atravesar la pared celular¹⁰.

La etapa hidrolítica puede ser la limitante de la velocidad global del proceso, sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos totales. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato, del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de NH₄⁺ y de la concentración de los productos de la hidrólisis¹¹.

- Etapa acidogénica. Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H₂) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y

⁸ GUEVARA VERA, Antonio. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaerobios rurales: Producción de gas y saneamiento de efluentes. Lima: División de salud y ambiente. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. 1999. Página 11.

⁹ MEJIA SANCHEZ, G. Digestión Anaerobia. Universidad Autónoma de Yucatán. Páginas 41-53.

¹⁰ BAUTISTA, Alejandro. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos. Universidad Carlos III De Madrid Escuela Politécnica Superior. Leganés. 2010. Página 19.

¹¹ ARBOLEDA, Yeison; SALCEDO GONZALEZ, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. Julio 2009.

etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso¹².

Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos¹³.

- Etapa acetogénica. Mientras algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos, otros deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato e hidrógeno, a través de las bacterias acetogénicas¹⁴. Es importante tener en cuenta que las bacterias acetogénicas, no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato.
- Etapa metanogénica. En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores¹⁵. Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano. Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético¹⁶.

1.2.2 Factores que intervienen. Las características bioquímicas que presenten estos residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico¹⁷. Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas.

Tabla 1. Composición bioquímica de la materia prima.

Materia prima	Lípidos%	Proteínas%	Celulosa%	Lignina%	Ceniza%
	3,23	9,05	32,49	35,57	19,66
	C%	N%	P ₂ O ₅ %	K ₂ O%	CaO%
Bovino (500 kg)	17,4 – 40,6	0,3 – 2	0,1 – 1,5	0,10	0,35
	Disponibilidad Kg/día	Relación C/N	Volumen de biogás		
			m ³ /kg húmedo	m ³ /día	
	10	25:1	0,04	0,4	

Fuente. Adaptado del manual del biogás. 2011¹⁸

¹² MINISTERIO DE ENERGÍA. Manual del biogás. Proyecto CHI/00/G32. Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. Chile. 2011. Página 21.

¹³ BAUTISTA, Alejandro. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Leganés. 2010. Página 19.

¹⁴ MINISTERIO DE ENERGÍA Op. Cit., página 21.

¹⁵ BAUTISTA Op, cit., página 19.

¹⁶ MINISTERIO DE ENERGÍA Op. Cit., página 22.

¹⁷ Lbid., página 30.

¹⁸ Lbid., página 30.

- Temperatura y tiempo de retención. Los procesos anaerobios, como muchos otros procesos biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura debido a que afecta la velocidad de reacción, los cuales dependen de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados y así mismo de la temperatura. Simultáneamente, la temperatura determina el tiempo de retención para la digestión y degradación de la materia orgánica dentro del digestor¹⁹. Existen tres rangos de temperatura en los que los microorganismos anaeróbicos reaccionan, los psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25°C y 45°C) y termófilos (entre 45°C y 65°C), normalmente el proceso de digestión funciona mejor a temperaturas mesofílicas. El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es decir, el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás²⁰.
- pH. El proceso anaerobio se ve afectado con pequeños cambios en los niveles de pH. Es recomendable que el proceso se encuentre en un rango de pH óptimo de 6,8 - 7,2²¹. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas²².

Los microorganismos que intervienen en cada etapa de la digestión son diferentes y debe establecerse un equilibrio entre la producción de ácidos, para que puedan coexistir dentro del digestor y encuentren las condiciones de temperatura adecuada para su desarrollo, también se debe tener en cuenta que el pH del estiércol depende del tipo de alimentación suministrada a cada animal, así como la edad y raza.

- Ácidos volátiles. El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla que se carga al digestor, es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúa satisfactoriamente; son aquellos que se liberan de una muestra que se volatiliza cuando se calienta durante dos horas a 600°C; y los sólidos volátiles contienen componentes orgánicos que teóricamente son convertidos a metano²³.
- Inhibidores. El proceso de digestión anaerobia es inhibido por la presencia de sustancias tóxicas en el sistema, sustancias tales como amoníaco y nitrógeno en concentraciones elevadas, sales minerales como los iones metálicos y algunas

¹⁹ BAUTISTA, Alejandro. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Leganés. 2010. Página 20.

²⁰ MINISTERIO DE ENERGÍA. Manual del biogás. Proyecto CHI/00/G32. Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. Chile. 2011. Página 38.

²¹ BAUTISTA, Alejandro. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de ciencia e ingeniería de materiales e ingeniería química. Leganés. 2010. Página 22.

²² Lbid., página 43.

²³ Lbid., página. 37.

sustancias orgánicas como detergentes, desinfectantes y químicos agrícolas que inhiben la digestión, porque destruyen las bacterias metanogénicas²⁴.

Aparte de la inhibición a causa por los ácidos, la fase metanogénica es inhibida por varias sustancias tóxicas, incluyendo metales pesados como el cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo y zinc²⁵.

- Demanda química de oxígeno (DQO). Es un parámetro que mide la cantidad de materia orgánica que puede ser oxidada mediante un agente oxidante en una muestra líquida. A medida que ocurre la degradación de la materia orgánica, la cantidad a ser oxidada disminuye, por lo que en este proceso de degradación se pretende disminuir la DQO con el tiempo²⁶.

1.2.3 Productos obtenidos. El biogás y el efluente estabilizado son los principales productos de la digestión anaerobia.

1.3 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

El biogás es una mezcla gaseosa que se obtiene principalmente de la descomposición de materia orgánica en condiciones anaeróbicas, cuyos principales componentes son el metano (55% - 65%) y el anhídrido carbónico (35% - 45%) y en menor proporción, nitrógeno (0% - 3%), hidrógeno (0% - 1%), oxígeno (0% - 1%) y sulfuro de hidrógeno (trazas) que se producen como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno por la acción de microorganismos presentes en la materia orgánica²⁷.

1.3.1 Efluentes. De los productos que se obtienen después del proceso, además de generar gas combustible, la fermentación anaerobia de la materia orgánica produce un residuo orgánico con excelentes propiedades fertilizantes, los cuales tienen alto contenido de nitrógeno, fósforo y potasio. La composición del bio-abono en promedio tiene 8,5% de materia orgánica, 2,6% de nitrógeno, 1,5% de fósforo, 1,0% de potasio y un pH de 7,5²⁸.

Presenta ventajas en cuanto a que el bio-abono sólido o líquido no presenta malos olores y puede aplicarse directamente en el terreno de forma líquida en las proporciones correctas, si este se encuentra en forma sólida puede deshidratarse y almacenarse para su uso posterior.

²⁴ BAUTISTA. Op. Cit., página 22.

²⁵ CAICEDO. M, Francisco. J. Diseño, construcción y arranque de un reactor U.A.S.B. piloto para el tratamiento de lixiviados. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. Página 8. 2006.

²⁶ GUERRA. M, Francisco. J. Caracterización de aguas residuales. Laboratorio de Ingeniería ambiental. Universidad Iberoamericana Ciudad de México. México. D. F. Página 7. 2008.

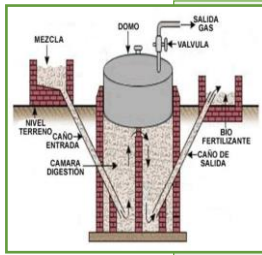
²⁷ BAUTISTA. Op. Cit., página 24.

²⁸ BOTERO, R; PRESTON, T. R. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización. Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV). Cali, Colombia. 1987.

1.4 DIGESTORES

Existen varios tipos de digestores anaerobios para el proceso de producción de biogás, entre los más importantes están los que se detallan en la ilustración 1.

Ilustración 1. Tipos de digestores.



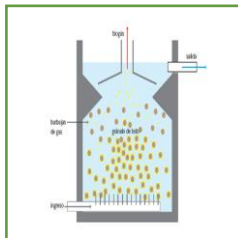
Domo flotante (India). Consiste en un tambor, originalmente hecho de acero, pero después reemplazado por fibra de vidrio reforzado en plástico (FRP) para superar el problema de corrosión. Se construye la pared del reactor y fondo de ladrillo. Se entrapa el gas producido bajo una tapa flotante que se desplaza por una guía central. Trabaja a presión constante. El reactor se alimenta semi-continuamente a través de una tubería de entrada



Digestor de flujo pistón de estructura flexible. Consiste en una bolsa de polietileno, en el que el gas se va acumulando en la parte superior de la bolsa-reactor, parcialmente llena con materia orgánica en fermentación, la bolsa se va inflando lentamente con una presión baja.



Tanque de almacenamiento y cúpula de polietileno. Se caracteriza por tener una estructura semiesférica de polietileno de película delgada en sustitución de la campana móvil y la cúpula fija, y un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo como los empleados en los prototipos tradicionales.



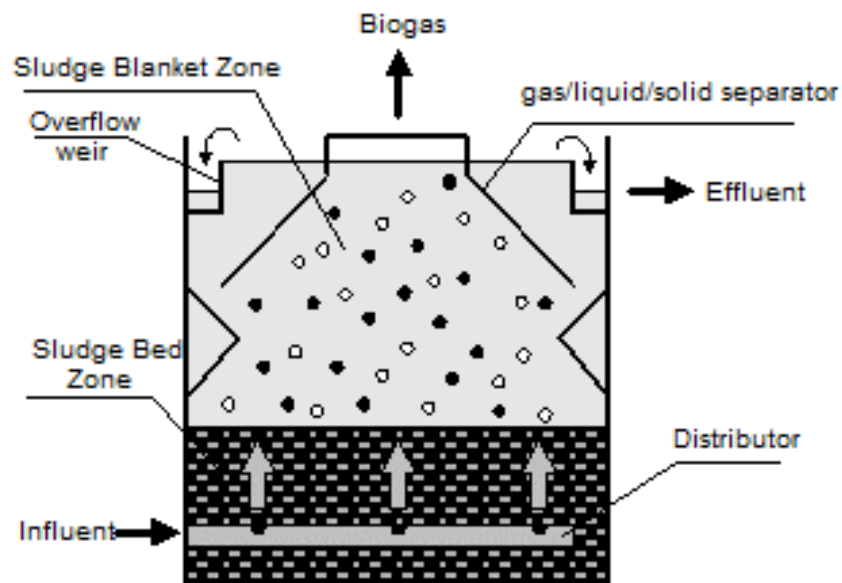
U.A.S.B. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente y Manto de Lodos, aparece entonces como una opción viable para el tratamiento de efluentes orgánicos líquidos. El mismo fue desarrollado en los años 70 por Lettinga y colaboradores y es ahora aplicado mundialmente para el tratamiento de efluentes locales en países de clima tropical.

Fuente. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos. 2010²⁹. Modificado por autores.

²⁹ BAUTISTA, Alejandro. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Leganés. 2010. Página 31-37.

De acuerdo a lo anterior y a una revisión de artículos científicos^{30,31,32} relacionados con el proceso de digestión, los reactores más usados para este proceso son los reactores U.A.S.B, se define como Upflow Anaerobic Sludge Blankett o Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente; es una tecnología aplicada especialmente al tratamiento de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica³³. En la figura 2 se detalla un esquema de este reactor en donde se identifican las zonas principales.

Figura 2. Esquema general de un reactor U.A.S.B



Fuente. Reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB).

Adicionalmente, su operación se basa en la actividad autorregulada de diferentes grupos de bacterias que degradan materia orgánica convirtiéndola en biogás y formando un lodo biológicamente activo en el reactor. Estos reactores logran eficiencias de remoción entre el 60 y 80 % de la DQO. Las principales ventajas que ofrece el reactor UASB son, su fácil operación, los bajos requerimientos nutricionales y producción del lodo, ya que pueden manejar cargas orgánicas muy

³⁰ CALDERA, Yaxcelys; MADUEÑO, Pedro; GRIBORIO, Alonso; FERNANDEZ, Nola; GUITIERREZ, Edixon. Effect of the organic load in the performance the UASB reactor treating slaughterhouse effluent. En: Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad de Zulia. Agosto, 2005. Vol. 28, no. 2. ISSN 0254-0770.

³¹ PARRA HUERTAS, Ricardo Adolfo; CAMPOS MONTIEL, Rafael Germán. Treatment of acid whey in a UASB reactor at different constant and punctual charges. En: Revista Producción + Limpia. Julio- Diciembre, 2003. Vol. 8, no. 2, ISSN 1909-0455.

³² LORENZO, Yaniris; OBAYA, Ma. Cristina. La digestión anaerobia y los reactores U.A.S.B. Generalidades. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), vol. XL, no. 1, Enero-Abril, 2006, pp. 13-21. ISSN: 0138-6204

³³ MÁRQUEZ VÁZQUEZ, Marjorie; MARTÍNEZ GONZÁLEZ, Sergio A. Reactores anaerobios de Flujo ascendente (RAFA's o UASB) Antología. Centro Tecnológico Aragón. México. 2011. Página 26.

variables y se conservan sin alimentación por largo tiempo, a diferencia de los digestores aerobios, por otra parte, los compuestos de la materia orgánica se degradan más fácil y rápidamente en condiciones anaerobias, además, la campana con la que cuenta el diseño asegura la separación de sólidos, líquidos y gases, para obtener el biogás, condiciones con las que no cuenta un sistema aerobio, finalmente, los costos de inversión y operación son bajos³⁴.

1.4.1 Cálculos de un reactor anaerobio de flujo ascendente UASB. Se propone una secuencia de ecuaciones de acuerdo a este tipo de reactor propuestas por Márquez³⁵.

Ecuación 1. Volumen del reactor.

$$V_R = TRH * Q * 1440$$

THR: Tiempo de residencia hidráulica

Q: Caudal mínimo

1440 es un factor de conversión de minutos a días para que el volumen se pueda expresar en mL.

Ecuación 2. Área del reactor.

$$A_R = \frac{\pi D^2}{4}$$

A_R : Área del reactor

D: Diámetro del tubo

Ecuación 3. Altura efectiva del reactor.

$$L = \frac{4 * V_R}{\pi D^2}$$

L: Altura efectiva

V_R : Volumen del reactor

Ecuación 4. Flujo másico. Este se expresa en Kg DQO/día.

$$F = V_R * Carga$$

V_R : Volumen del reactor

³⁴ DELGADO AYALA, José Luis; OTERO FLOREZ, Julián Alberto. Diseño, construcción y operación de un sistema biológico UASB a nivel piloto para el tratamiento de los lixiviados producidos en el relleno sanitario del municipio de San Gil. Universidad industrial de Santander, Facultad de ingenierías. Bucaramanga. 2008.

³⁵ MARQUEZ. Op., cit., página 20.

Ecuación 5. Carga hidráulica.

$$C_H = \frac{Q}{A_R}$$

A_R : Área del reactor
Q: Caudal mínimo

Ecuación 6. Velocidad de flujo en la campana.

$$V_C = 4 * C_H$$

C_H : Carga hidráulica

- Separador de gas del líquido. Los parámetros del diseño básico para la campana son:

Ecuación 7. Área de la cobertura.

$$A_{Cobertura} = \frac{Q}{V_C}$$

V_C : Velocidad de flujo en la campana
Q: Caudal mínimo

Ecuación 8. Área de la sección transversal de la campana.

$$A_{Campana} = A_R - A_{Cobertura}$$

A_R : Área del reactor

Ecuación 9. Radio mayor de la campana.

$$A_{Campana} = \pi R_{campana}^2$$

$$R_{Campana} = \sqrt{\frac{A_{Campana}}{\pi}}$$

Ecuación 10. Ancho de la abertura.

$$W_{Abertura} = R_{Reactor} - R_{Campana}$$

$R_{Reactor}$: Radio del reactor
 $R_{Campana}$: Radio de la campana

- Ángulo de inclinación de la campana. Se recomienda según la literatura un ángulo de 60°C, debido a que se ajusta de forma más adecuada a las condiciones de diseño, tanto de la campana como del tubo del reactor.

Ecuación 11. Altura de la campana.

$$W_G = R_{Campana} - \frac{1}{2} (W_{abertura})$$

$W_{abertura}$: Ancho de la abertura

$R_{Campana}$: Radio de la campana

$$H_G = W_G * \tan \alpha$$

$\tan \alpha$: Ángulo de inclinación de la campana

1.5 ESTIÉRCOL DE VACA

El estiércol bovino es usualmente utilizado como fertilizante con la finalidad de acondicionar el suelo mejorando así su estructura, ya que contiene gran número de bacterias que estimulan la vida microbiológica del suelo. Este estiércol se ha venido estudiando como materia prima en el diseño de digestores debido a su alto contenido en carbono (7,3%) nitrógeno (1% - 3%), fósforo (0,3% - 1%), potasio (0,8% - 2%) y otros macro nutrientes como calcio, hierro y magnesio es por esto que crea un efecto acidificante en suelos. El estiércol bovino libera aproximadamente la mitad de sus nutrientes en el primer año y estos varían dependiendo del tipo de vaca y su dieta³⁶.

1.5.1 Cantidad de estiércol producido. Una vaca produce tres subproductos que tienen relación directa a su peso vivo. Produce, aproximadamente, un 8% de su peso vivo diariamente en estiércol y orina, es decir, produce unos 50 Kg/día y por lo tanto pueden generar 2 KV/h de energía eléctrica³⁷. Sin embargo, es una aproximación de lo que podrían generar debido a que la cantidad de estiércol, producido por una vaca, depende de diferentes factores como su dieta, peso, tipo de ganado y condiciones ambientales.

1.5.2 Composición química. Varía entre edad, clase y características del animal, cantidad y digestibilidad del forraje, alimentos concentrados consumidos, cantidad y tipo de cama, duración, forma de almacenamiento y método de manejo del

³⁶ PASOLAC. Guía Técnica de Conservación de Suelos y Agua. [Citado el 25 de Enero del 2016] Disponible en internet: <http://www.funica.org.ni/docs/conser_sueyagua_49.pdf>.

³⁷ RIVERA VLADERRAMA, María Fernanda; DE LA ROSA PORRAS, Cesar Claudio. Desarrollo de la ingeniería básica del sistema de producción de biogás a partir de estiércol de ganado vacuno de la finca Sierra Morena a escala de planta piloto. Fundación Universidad de América. 2009. Página 30.

estiércol³⁸. En la Tabla 2 se menciona la composición química del estiércol bovino, cantidad de materia orgánica, minerales y micronutrientes.

Tabla 2. Composición química en % del estiércol de vaca con un pH 7.1

Materia orgánica	Nitrógeno (N)	Fósforo (P)	Potasio (K)	Calcio (Ca)	Magnesio (Mg)	Humedad
36.1	1.51	1.20	1.51	3.21	0.53	25.5

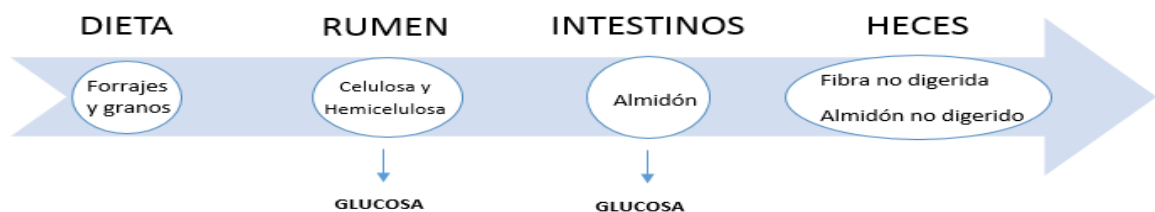
Fuente. Estiércol bovino mitos y realidades³⁹.

El estiércol de vaca se compone principalmente por:

- Carbohidratos. Estos hacen parte de la fuente de energía más importante y los principales precursores de grasa y azúcar en la leche de la vaca. Los microorganismos presentes en el rumen permiten obtener los carbohidratos fibrosos como celulosa y hemicelulosa que se ligan posteriormente a la lignina en las paredes de las células vegetales. La rumia aumenta la separación y fermentación de fibra y estimula la saliva hacia el rumen, la cual al contener bicarbonato de sodio y fosfatos el pH se mantiene casi neutro⁴⁰.

Además, los carbohidratos no fibrosos como almidones y azúcares se fermentan rápida y completamente en el rumen; igualmente mejoran la densidad de energía en la dieta, sin embargo no estimulan la rumia o la saliva cuando se encuentran en exceso haciendo que pueda darse inhibición en la fermentación de la fibra. Es por esto que debe haber un equilibrio entre carbohidratos fibrosos y no fibrosos. En la figura 3 se resume la transformación de carbohidratos a estiércol⁴¹.

Figura 3. Transformación de carbohidratos a estiércol.



Fuente. Metabolismo de carbohidratos en vacas lecheras.

³⁸ Lbid., página 31.

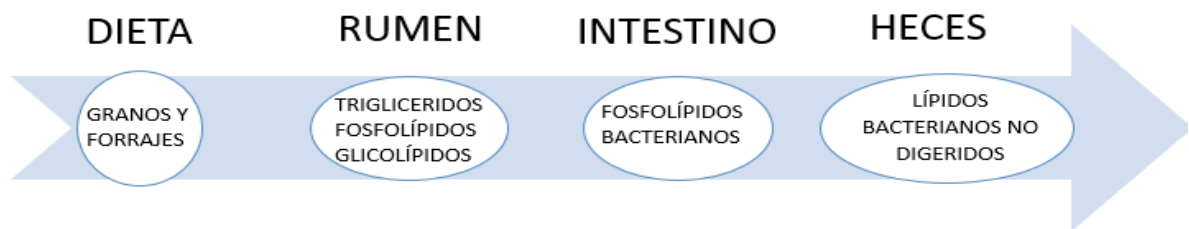
³⁹ GARCÍA, Lisbet; SUÁREZ, Yolanda E; HERNÁNDEZ, Rodolfo O; BETANCOURT, Alexander. Estiércol bovino Mitos y realidades. En: Revista Asociación Cubana de Producción Animal (ACPA). No. 4. 2009. ISSN 0138-6247.

⁴⁰ WATTIAUX, Michel A., ARMENTANO, Louis E. Metabolismo de carbohidratos en vacas lecheras. Instituto Babcock. 1999. Página 9. [Citado el 1 de Febrero de 2016]. Disponible en: <<https://ganaderiasos.files.wordpress.com/2015/03/metabolismo-de-carbohidratos-en-vacas-lecheras.pdf>>

⁴¹ Lbid., página 9.

- Lípidos. Son parte importante de la ración de una vaca lechera porque contribuyen directamente a casi el 50% de la grasa en la leche y son la fuente más concentrada de energía en los alimentos. Los fosfolípidos bacterianos no digeridos como los triglicéridos, fosfolípidos y glicolípidos se forman en el rumen de la vaca por medio de las bacterias encontradas en él, los cuales provienen en su mayoría de la dieta del animal. En la figura 4 se resume la transformación de lípidos a estiércol⁴².

Figura 4. Transformación de lípidos a estiércol.



Fuente. Metabolismo de lípidos en vacas lecheras⁴³.

1.5.3 Composición física. El estiércol dependiendo de la cantidad de líquido (con o sin orina) que contenga puede ser manejado como un líquido, lodo, semisólido o sólido, estas condiciones se deben tener en cuenta para proceder a su manipulación, recolección, transferencia, almacenamiento y tratamiento.

- Estiércol sólido. Combinación de orina, cama y heces sin agua extra adicionada, con un porcentaje aproximado de 25% de sólidos totales.
- Estiércol semisólido. Antes de la manipulación se produce un pequeño secado. Contiene aproximadamente entre 12% y 20% de sólidos totales.
- Estiércol líquido. Es una combinación de heces y orina con muy poca dilución, la cual al ser una mezcla muy fluida se puede manejar con bombas. Es aquel que tiene menos de un 10% de sólidos totales⁴⁴.

1.5.4 Pérdida de nutrientes. El estiércol bovino en dos o tres días en el sol puede perder el 50% de su nitrógeno (N) y puede perder por lluvias en poco tiempo gran parte de su nitrógeno (N) y fósforo (P). Para evitar estas pérdidas de nutrientes del

⁴² WATTIAUX, Michel A., ARMENTANO, Louis E. Metabolismo de lípidos en vacas lecheras. Instituto Babcock. 1999. Página 14. [Citado el 1 de Febrero de 2016]. Disponible en: <<https://ganaderiasos.files.wordpress.com/2015/03/metabolismo-de-lipidos-en-las-vacas-lecheras.pdf>>

⁴³ Lbid., página 14.

⁴⁴ RIVERA; DE LA ROSA PORRAS, Op. cit., página 32.

estiércol se debe recoger diariamente y permanecer en condiciones de sombra⁴⁵.

1.5.5 Contaminación causada. El manejo inadecuado del estiércol de bovinos causa problemas ambientales inicialmente en el suelo, puesto que ocasionan un aporte excesivo de minerales dentro de los cuales hay presencia de metales pesados que acidifican el terreno y facilitan la transmisión de enfermedades; sobre las aguas superficiales y subterráneas originan eutrofización, (enriquecimiento de las aguas con nutrientes, a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total), produciendo una disminución del oxígeno en las aguas profundas a causa del aporte de nitrógeno y fósforo, aumento de toxicidad por el aporte de iones amonio y nitratos, aumentan la Demanda Biológica o Bioquímica de Oxígeno (DBO) y sobre la atmósfera, emite olores y gases de efecto invernadero, principalmente el metano y el óxido nitroso⁴⁶.

1.6 DESCRIPCIÓN DE LA FINCA EL RECODO

La finca El Recodo está ubicada en el kilómetro 6, vía Cajicá – Tabio, Cundinamarca, con una extensión de 40 hectáreas, las cuales se distribuyen en una casa principal donde se ubican las oficinas y una bodega, una casa para los empleados, un establo, un taller y una gran zona dividida en cuadras con cercas eléctricas para el pastoreo del ganado. También, cuenta con una laguna, agua proveniente de una montaña y de la lluvia, la cual usan para riego del terreno.

En cuanto al ganado, existen 21 vacas adultas con edad entre 36 a 60 meses, 10 terneras, 4 novillas y 3 caballos.

1.6.1 Consumo de gas y energía mensual en la finca. El consumo del gas mensual se distribuye de la siguiente forma:

- Casa principal: 33 Lb
- Casa empleados: 40 Lb
- Oficina: 7 Lb

El consumo de luz promedio para toda la finca es de 1500-2500 KW/mes, de los cuales 800KW/mes se consumen entre la casa principal, oficina y taller, el valor restante es para meses en que realizan riego y para la casa de empleados.

⁴⁵ CUASQUER H., Roberto A. Efectos de la aplicación de tres niveles de abonos orgánicos en el cultivo haba en la zona de Cuesca, provincia del Carchi. Universidad Técnica de Babahoyo. Facultad de ciencias agropecuarias. Escuela de ingeniería agronómica. El Ángel – Ecuador. Página 19. 2013.

⁴⁶ PINOS R., Juan M; GARCÍA L., Juan C; PEÑA A. Luz Y. Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. Instituto de Zonas Desérticas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). México. 2012.

Ilustración 2. Finca El Recodo



2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto se tendrán en cuenta cuatro etapas, la primera en la que se establecerán las condiciones de operación tanto, para el sistema de digestión anaerobio convencional como para el nuevo prototipo para la finca El Recodo; en la segunda, teniendo en cuenta el diseño de un digestor convencional, se construirá el nuevo prototipo a escala banco; seguido a esto, se realizará una evaluación de la producción de biogás en los dos equipos y por último se compararán las variables tiempo y producción de biogás utilizando métodos estadísticos y físicos.

2.1 ESTABLECER LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA LOS SISTEMAS DE DIGESTIÓN

En esta sección se describen las variables de operación que se deben considerar como la temperatura, pH, caudal de entrada del afluente, cantidad de materia orgánica y tiempo de retención, por ser parámetros determinantes para el correcto funcionamiento del reactor UASB ⁽⁴⁷⁾ ⁽⁴⁸⁾; mencionando el procedimiento que se llevó a cabo para medir y controlar las variables.

2.1.1 Temperatura. Es uno de los factores principales en el proceso de digestión que afectan el crecimiento de las bacterias responsables de la producción de biogás. La velocidad de degradación de la materia orgánica incrementa con una temperatura de trabajo. Por ello, se debe realizar un seguimiento de la temperatura para favorecer que los microorganismos mesofílicos presentes en el bio-reactor realicen el proceso biológico dentro del rango óptimo que está entre 25°C y 45°C⁴⁹.

Las mediciones de temperatura ambiente se tuvieron en cuenta para conocer su variación en el transcurso del día y saber a qué temperatura estarían sometidos los digestores. Para monitorear la temperatura interna de los digestores se adaptarán termómetros bimetálicos (Anexo A) en cada uno, que permita la lectura de un rango entre -20°C a 120°C, dentro del cual se estimó la variación de temperatura esperada en los digestores.

2.1.2 pH. Para el buen funcionamiento del proceso de digestión, según referencias bibliográficas se requiere que el pH del sustrato se encuentre entre un

⁴⁷ CHANG F., LIN C. Biohydrogen production using an up-flow anaerobic sludge blanket reactor. International journal of hydrogen energy. 2004. Page. 33 – 39.

⁴⁸ SÁNCHEZ E., Borja R; TRAVIESO L, Martín A; COLMENAREJO M. Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste. Bioresource Technology 96. 2005. Page. 335–344.

⁴⁹ LOBATO F., Álvaro. Estudio de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos con otros sustratos agroindustriales. Universidad de León. Instituto de medio ambiente, recursos naturales y biodiversidad. Área de Ingeniería Química. León. 2012. Página 36.

rango de 6,8 – 7,2 para dar inicio a la digestión ⁽⁵⁰⁾ ⁽⁵¹⁾. Para determinar el pH se hará uso de un pHmetro OHAUS portátil que permite la lectura de pH en lodos introduciendo el mismo directamente en la mezcla, sin necesidad de hacer dilución. (Anexo A).

2.1.3 Tiempo de retención hidráulico. Indica el tiempo necesario en el que la mezcla debe permanecer en los digestores para que ocurra la fermentación completa⁵². El TRH se calcula por medio de la ecuación 12 la cual está directamente relacionada con la temperatura ambiental de los reactores⁵³.

Ecuación 12. Tiempo de retención hidráulico.

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

2.1.4 Caudal de entrada del afluente. Teniendo en cuenta que el proceso de digestión en la finca El Recodo será un proceso de una sola fase debido a que el proceso se lleva a cabo en un solo reactor y discontinuo, es decir, que el reactor será cargado una sola vez. El caudal de entrada del afluente se tendrá en cuenta para los cálculos necesarios del reactor. Según las ecuaciones mencionadas en la sección 1.4.1 del reactor UASB, para determinar el caudal es necesario conocer el tiempo de residencia hidráulica (TRH) y el volumen del reactor.

Usando la ecuación 13 se determina el caudal, la cual se adquirió del resultado de una investigación bibliográfica en México donde se emplea este reactor para llevar a cabo la digestión⁵⁴.

Ecuación 13. Caudal de entrada del afluente

$$V_R = \text{TRH} * Q * 1440$$

TRH: Tiempo de residencia hidráulica

Q: Caudal mínimo

1440 es un factor de conversión de minutos a días para que el volumen se pueda expresar en mL.

2.1.5 Volumen de materia orgánica. La cantidad de materia orgánica se calculará a partir del volumen del reactor; inicialmente es necesario tener en cuenta que el

⁵⁰ BAUTISTA. Op. cit., página 22.

⁵¹ MINISTERIO DE ENERGÍA. Op. cit., página 43.

⁵² HAMED M., Zeeman G.; WILKO K.P, Gerard P. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure. Faculty of Agriculture, Mansoura University, E1-Mansoura, Egypt. Bioresource Technology 95. 2004. Page.191–201.

⁵³ UPME. Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Documento ANC-0603-19-01. Marzo 2003.

⁵⁴ MÁRQUEZ VÁZQUEZ, Marjorie; MARTÍNEZ GONZÁLEZ, Sergio A. Reactores anaerobios de Flujo ascendente (RAFA's o UASB) Antología. Centro Tecnológico Aragón. México. 2011. Página 26.

70% del volumen del reactor corresponde a la mezcla y el 30% debe ser para el biogás que se va a generar⁵⁵. Para asegurar que la mezcla degrade la materia orgánica, según lo reportado en la literatura, se debe considerar una relación 1:3 (estiércol:agua)⁵⁶ asegurando el crecimiento de los microorganismos para la digestión. Se usan las ecuaciones 14 y 15 para el cálculo del volumen de la mezcla que ingresaría al reactor.

Ecuación 14. Volumen del líquido.

$$V_L = 0,75 V_T$$

Ecuación 15. Volumen de estiércol.

$$V_E = 0,25 V_T$$

2.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

En esta sección se realiza el montaje de los digestores, tanto el convencional como el nuevo prototipo siguiendo los parámetros posteriormente mostrados y un procedimiento de construcción que se encuentra en el Anexo B.

En primera instancia se describen las características de construcción del sistema de digestión convencional, las cuales son:

2.2.1 Material y forma de los digestores. Para seleccionar el material de los digestores se analizaron en el mercado las características de los recipientes que cumplieran con la rigidez, porosidad, hermeticidad, resistencia a cambios de pH, resistencia a la bio-corrosión que puede formarse en las paredes del reactor en forma de bio-película; inerte y poco deformable a la fuentes térmicas del medio en el que se encuentra para asegurar el control y operación de los digestores. En cuanto a la forma de los reactores, se ajustará al diseño de un reactor UASB.

2.2.2 Dimensiones de los digestores de flujo ascendente. Las dimensiones de los digestores serán las que corresponden a los cálculos mostrados en la sección 1.4.1 de generalidades para reactores UASB.

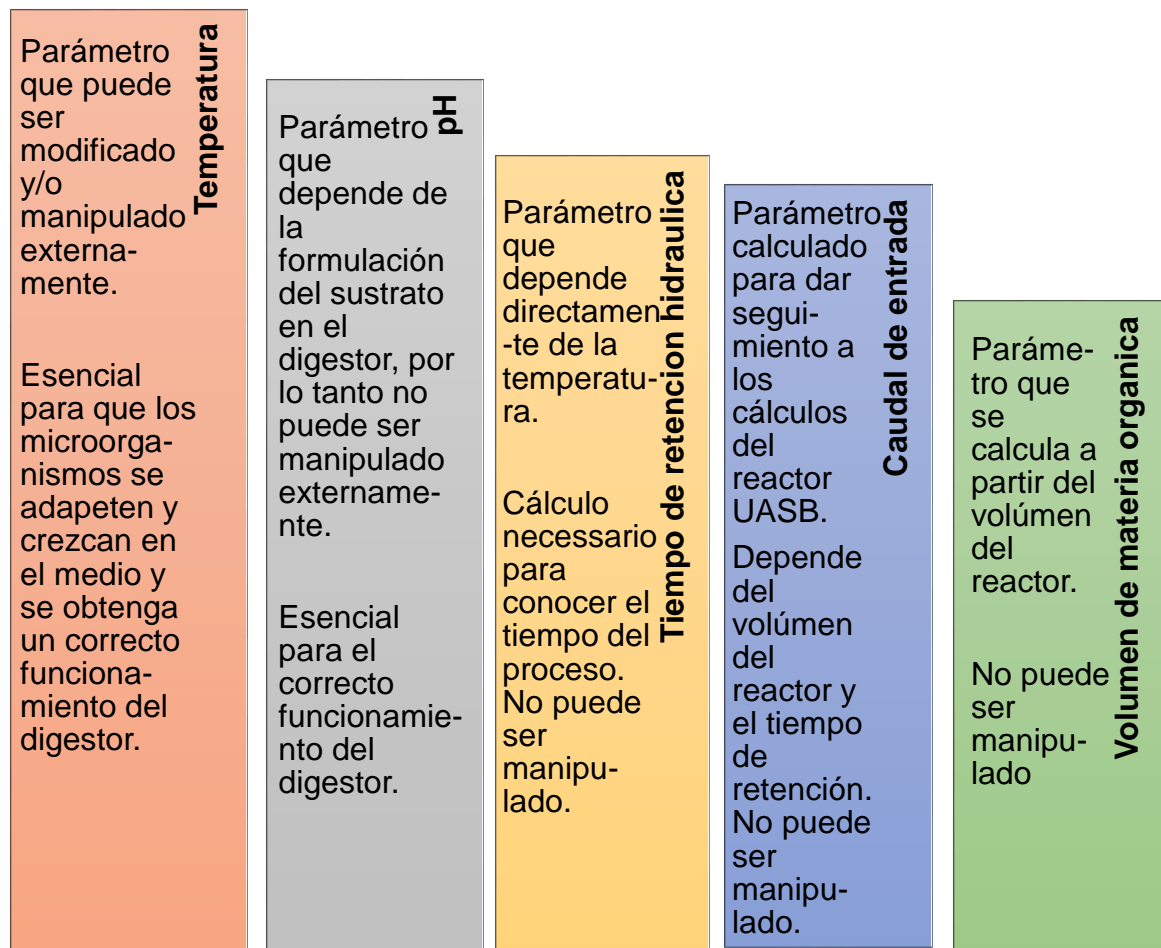
⁵⁵ YANK L, Marina. Estudio de la producción de biogás en función de la cantidad de residuos de madera en un biodigestor tipo de carga única o batch. Universidad Nacional de Nordeste. Grupo de investigación en Energías Renovables (GIDER). Departamento de Termodinámica. Facultad de Ingeniería. Chaco, Argentina. 2005. Página 2.

⁵⁶ OSORIO. S, Jairo A.; CIRO. V, Héctor J.; GONZALES. S, Hugo. Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío. Universidad Nacional de Colombia. En: Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín. Vol. 60. ISSN 0304-2847. Medellín, Colombia. Septiembre 14 del 2007.

Además de las características de construcción para el sistema convencional descritas anteriormente, se adiciona en el procedimiento la mejora propuesta en este proyecto:

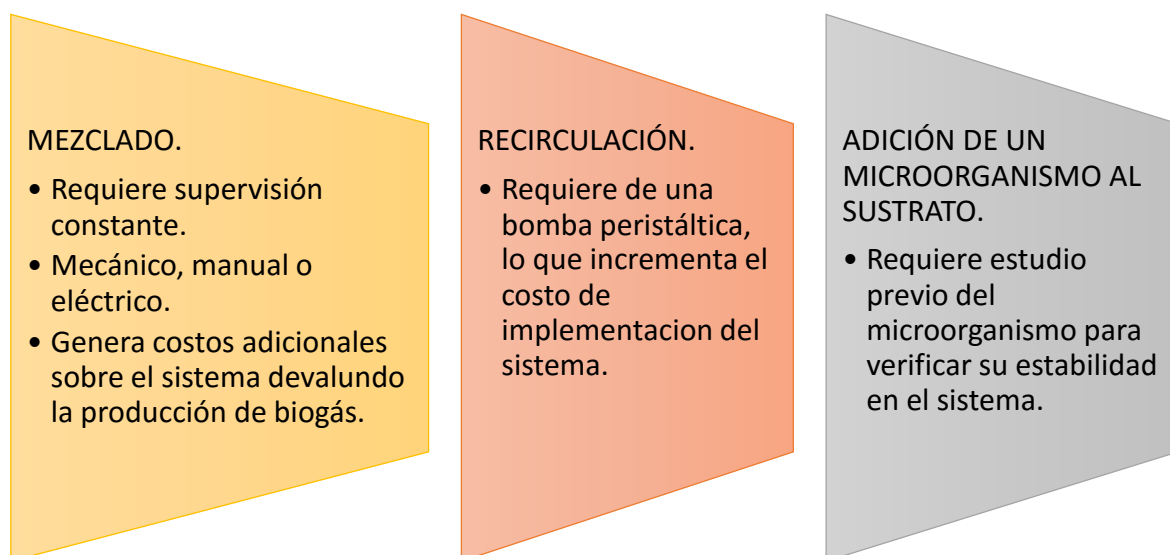
2.2.3 Alternativa para la mejora del nuevo prototipo. De acuerdo a los parámetros mencionados en la sección 2.1 y teniendo en cuenta que se busca realizar una mejora al digester, inicialmente se realiza el siguiente análisis acerca de los parámetros que tienen influencia sobre el proceso.

Ilustración 3. Análisis de parámetros que afectan el proceso.



Adicional a lo anterior, se pueden tener en cuenta los cambios físicos que se le pueden realizar al digester.

Ilustración 4. Análisis de parámetros físicos



De acuerdo a la ilustración 3 y 4, se realiza la matriz de selección que se detalla en la tabla 3, para establecer las ventajas y desventajas de los parámetros analizados y así seleccionar la mejor alternativa.

Tabla 3. Matriz de selección para la mejora del digestor nuevo prototipo.

	PARAMETROS QUE AFECTAN EL PROCESO					PARAMETROS FISICOS		
	Temperatura	pH	TRH	Caudal de entrada	Volumen de materia orgánica	Mezclado	Recirculación	Adición de un microorganismo
A	5	2	0	2	2	5	5	5
B	0	5	5	5	5	0	0	3
C	1	0	0	1	2	5	5	5
D	0	0	3	0	0	2	1	5
TOTAL	6	7	8	8	9	12	11	18

En la tabla 3, las letras A, B, C, D corresponden a manipulación, dependencia, aumento de costos y aumento del tiempo en el proceso respectivamente.

La matriz se evaluó tanto para los parámetros físicos como para los que afectan el proceso, con una puntuación de 0-5, teniendo en cuenta la siguiente escala.

- 5: Alto
- 4: Medio Alto
- 3: Medio
- 2: Medio bajo
- 1: Bajo
- 0: Nulo

Con respecto a la escala, se espera que el valor total mínimo indique la mejor alternativa para implementar en el sistema de digestión anaerobio, es por esto que se escoge la temperatura, debido a que fue la variable que arrojó la menor puntuación y es el principal parámetro que afecta el proceso de digestión y puede ser manipulado a diferencia de los otros, sin aumento de costos significativos.

Según la ilustración 4, la implementación del mezclado interno en el digestor, no se llevará a cabo por el costo que genera al ser mecánico o eléctrico; y si es manual, sería necesario un operario que agite constantemente a la misma velocidad, lo cual no se puede asegurar. En el caso de la recirculación, la inversión sería aún mayor. Por último, la adición del microorganismo requiere un tiempo adicional para estudiarlo, seleccionarlo y realizar el presente proyecto.

De lo anterior, se decide trabajar la mejora con base en la estabilidad de la temperatura. La cual consiste en realizar un recubrimiento al digestor, para asegurar una temperatura uniforme en el interior del digestor y que los microorganismos mesofílicos presentes realicen el proceso biológico sin variaciones que afecten el proceso significativamente.

Adicionalmente, se realizará un recubrimiento al lugar en el que se ubicará el digestor, buscando en el mercado un material moldeable, impermeable, capaz de resistir los vientos, de alta transmitancia de la luz solar, de bajo costo y no inflamable, con el fin de proteger el digestor⁵⁷.

2.2.4 Selección del tipo de almacenamiento para el biogás. Para los dos digestores en estudio, el biogás producido durante el tiempo de retención hidráulica se almacenará en gasómetros, recipiente inerte, sin riesgos de contaminación microbiológica, sin escapes, ni porosidad y de bajo costo; adaptados a la salida de la manguera conductora del gas para realizar la cromatografía de gases al finalizar el proceso.

2.2.5 Selección y acondicionamiento de la instrumentación de entradas y salidas. Los digestores son de tipo anaerobio de flujo ascendente con lecho fijo, por lo cual a continuación se describen las entradas y salidas según corresponda.

⁵⁷ AGUILAR ALVAREZ, Gustavo. Control de temperatura y pH aplicado en biodigestores modulares de estructura flexible con reciclado de lodos a pequeña escala. Universidad Autónoma de Querétaro. México. 2013. Página 31.

- Entrada del afluente. De acuerdo a referencias bibliográficas ⁽⁵⁸⁾ ⁽⁵⁹⁾ se reconoce técnicamente como afluente a la materia orgánica, la cual se encuentra en el tanque de mezcla, en el que hay una conexión por medio de un tubo de PVC para dirigir por gravedad la materia orgánica a la parte inferior del digestor, con codos de acople de PVC adicionando dos válvulas o registros de paso en el tubo para prevenir la entrada de aire y controlar el paso de la mezcla.
- Salida del afluente. Se dirige hacia el exterior del tanque a través de tubería de PVC, en la que se colocó otro registro de paso para controlar la salida, igualmente se usa para dar paso a la captación de muestras del abono y realizar las pruebas necesarias durante el proceso.
- Salida del biogás. Se ubica en la parte superior del tanque, este sale a través de la campana del reactor, que tiene como función atrapar los gases que se van generando durante el proceso, de esta manera se dirige por la manguera hasta su almacenamiento.

La instrumentación descrita anteriormente de entradas y salidas se detalla en la figura 5. En cuanto a la figura 6, que corresponde al sistema de digestión anaerobio identificado como nuevo prototipo, es para aclarar ilustrativamente la diferencia entre el diseño de cada reactor, observando que este cuenta con el recubrimiento mencionado.

⁵⁸ ELMITVALLI, Tarek. Treatment of Municipal Wastewater in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor. Web based training. 2005. Page 3.

⁵⁹RUIZ, I.; SOTO A; VEIGA, M.; LIGERO, P. Performance of and biomass characterization in a UASB reactor treating domestic waste water at ambient temperature. Department of Fundamental and Industrial Chemistry, University of a Coruña, a Zapateira s/n, 15071 a Coruña, Galiza (Spain). ISSN 0378-4738. Water SA. Vol. 24 No. 3 July 1998. Page 216.

Figura 5. Diagrama de proceso del sistema convencional.

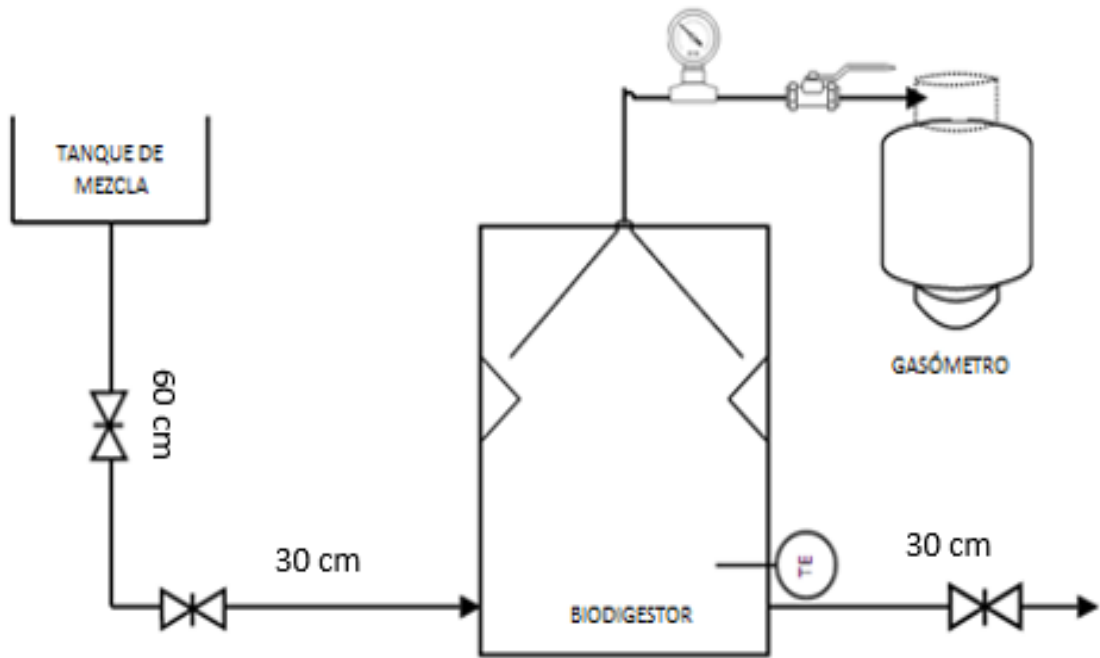
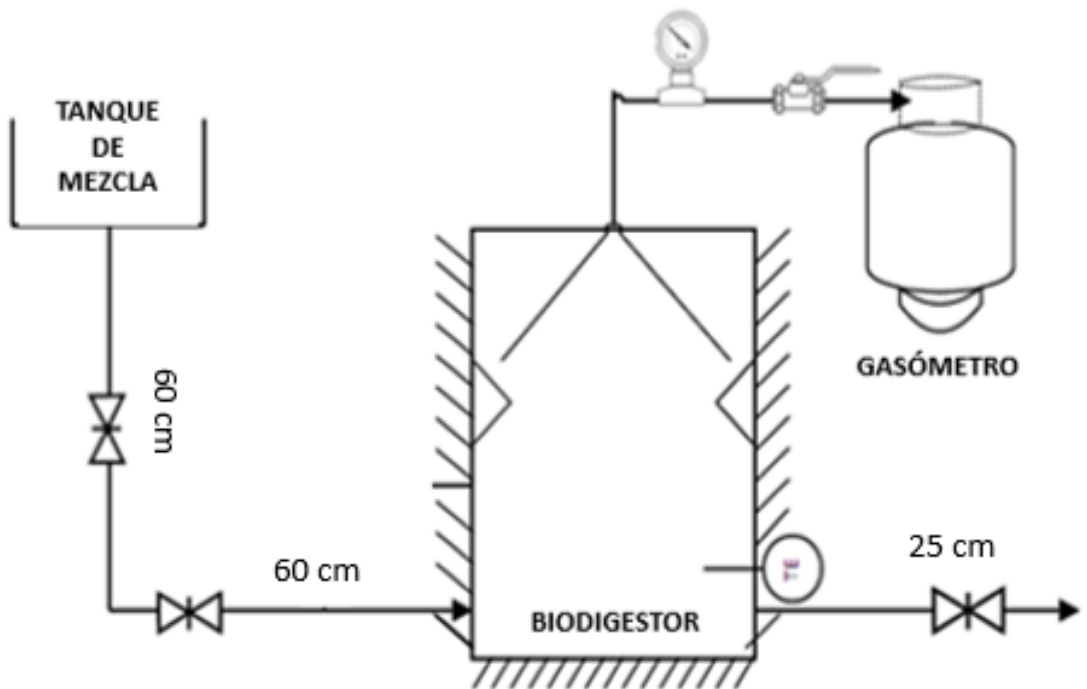


Figura 6. Diagrama de proceso con sistema de estabilización de temperatura.



Los instrumentos necesarios para la construcción de los dos sistemas de digestión con sus respectivos costos se detallan en el Anexo C.

2.2.6 Volumen de Biogás esperado. El volumen de biogás se estima por medio la ecuación 16, la cual tiene en cuenta la cantidad de sólidos volátiles en la mezcla y un factor de producción de biogás promedio encontrado en la literatura⁶⁰.

Ecuación 16. Volumen de biogás total esperado.

$$V_{Biogás\ Total} = SV * 0,27 * V_M$$

Fuente. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaerobios rurales: Producción de gas y saneamiento de efluentes. 1999.

Tabla 4. Factor promedio para la producción de biogás.

Tipo de desecho	Producción de Biogás $\frac{m^3}{m^3 M.O * DÍA}$
Estiércol Vacuno	0,27

Fuente. Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación. 2008⁶¹.

2.3 EVALUACION DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LOS DOS BIODIGESTORES

2.3.1 Puesta en marcha de los digestores. Se tendrán en cuenta los factores descritos en la sección 2.1. En primera instancia se debe realizar una prueba de fugas. El paso posterior, es realizar las mezclas de estiércol – agua para cada uno de los digestores. Luego de establecer la mezcla adecuada se procede a preparar el volumen de carga de los digestores. En el anexo D se describe el procedimiento completo que se realizó para llevar a cabo el proceso de digestión.

Adicionalmente, a la mezcla seleccionada, se le realizó una prueba de laboratorio para conocer la cantidad de sólidos totales, suspendidos y volátiles, nitrógeno, fósforo, carbono orgánico oxidable total, relación C/N, y DQO; y así, comparar las características del sustrato inicial alimentado a los reactores con las características al finalizar el proceso de digestión, los resultados se detallan en el anexo E.

⁶⁰ GUEVARA VERA, Antonio. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaerobios rurales: Producción de gas y saneamiento de efluentes. Lima: División de salud y ambiente. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. 1999.

⁶¹ HERRERO, Jaime M. Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación. Cooperación técnico alemana. Bolivia. 2008.

2.3.2 Parámetros de evaluación. Se realizarán mediciones periódicas de parámetros como temperatura ambiental e interna de los digestores, presión, pH y DQO, haciendo uso de los instrumentos que se observan en la tabla 5 y sus especificaciones que se encuentran en el Anexo A. Estos parámetros permitirán realizar las comparaciones entre los dos sistemas, teniendo en cuenta el tiempo que dure el proceso de descomposición de la materia orgánica.

Tabla 5. Parámetros de evaluación con sus respectivos instrumentos de medición.

MEDICIÓN	INSTRUMENTO
Temperatura ambiental	Termómetro ambiental
Temperatura de los digestores	Termómetro bimetálico rango -20°C+120°C
Presión	Manómetro 0-60 psi
pH	pHmetro OHAUS

2.3.3 Análisis de laboratorio. Se realizarán para conocer la composición de nutrientes presente en el sustrato y de los parámetros que aseguran que el proceso se lleva a cabo en correctas condiciones para la producción del biogás. Los análisis a evaluar serán DQO por el método Walkley Black⁽⁶²⁾ ⁽⁶³⁾ (Anexo F), del cual se tendrán tres pruebas que corresponden al inicio, mitad y final del proceso. El análisis de nitrógeno se realiza por el método titulométrico o método kjeldahl⁶⁴; análisis de carbono por medio del método Walkley Black; pruebas de potasio y fósforo por medio de los métodos espectroscópico y colorimétrico respectivamente y el análisis de sólidos suspendidos, volátiles y totales, por método gravimétrico⁶⁵; de estos últimos se analizarán los sólidos al inicio y final del proceso. Por último, se realizará una cromatografía de gases GLC con el fin de establecer y evaluar la eficiencia de los digestores.

Adicional a esto, se realizaran dos pruebas microbiológicas, inicialmente una coloración de Gram para verificar que se encuentren microorganismos en el sustrato y de esta manera ocurra la degradación; por otra parte, se realizará una prueba para evaluar la actividad enzimática para detectar microorganismos proteolíticos, amilolíticos y celolíticos con el fin de asegurar que los microorganismos presentes degraden proteínas, celulosa y almidón, dando lugar a completar la etapa hidrolítica dentro del sistema de digestión anaerobio.

⁶² Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 19 ed., New York, 1995. Page 5-16.

⁶³ Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, 1983.

⁶⁴ Lbid., página 34.

⁶⁵ VIVES DE ANDRÉIS, 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 (INVERMAR). Colombia. 2003. Páginas 30-34.

2.4 COMPARACION DE LAS VARIABLES TIEMPO Y PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIO PARA LOS DOS BIODIGESTORES

Para la comparación de la producción de biogás en cada digestor se harán análisis físicos y estadísticos de la siguiente manera.

2.4.1 Análisis físicos. Debido a que el producto de la digestión anaerobia es el biogás, el cual está compuesto por diferentes gases, se realizará una cromatografía de gases para conocer la composición del mismo. De esta manera se hace una comparación cuantitativa de la cantidad de hidrógeno (H_2), oxígeno (O_2) y metano (CH_4) del biogás en el digestor convencional y el nuevo prototipo.

2.4.2 Análisis estadísticos.

- ANOVA: Análisis de varianza que permite la comparación de varios grupos, en este caso parámetros esenciales como DQO, temperatura y pH; con esta prueba lo que se quiere es concluir si los parámetros medidos afectan la variable de respuesta o no, es decir, si estos parámetros escogidos fueron los correctos para analizar el comportamiento de la digestión.

3. RESULTADOS

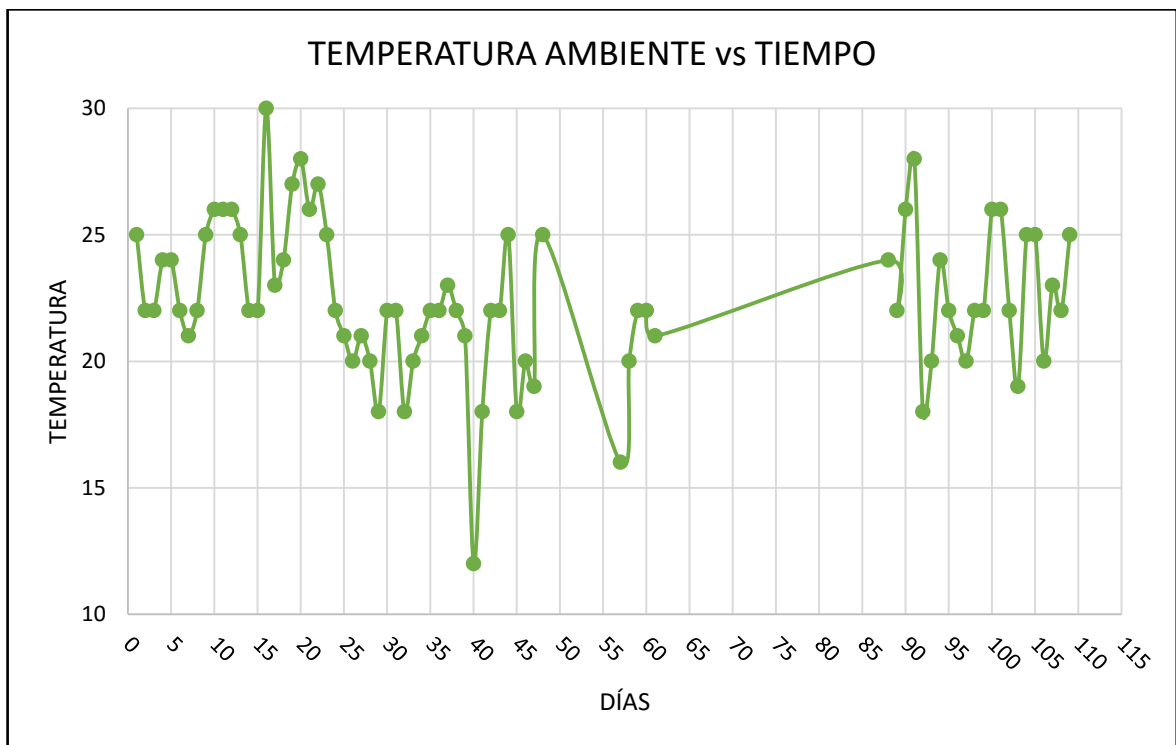
3.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

En esta sección se darán a conocer los resultados obtenidos para las condiciones de operación en las cuales trabajaron los digestores durante el proceso de degradación de la materia orgánica.

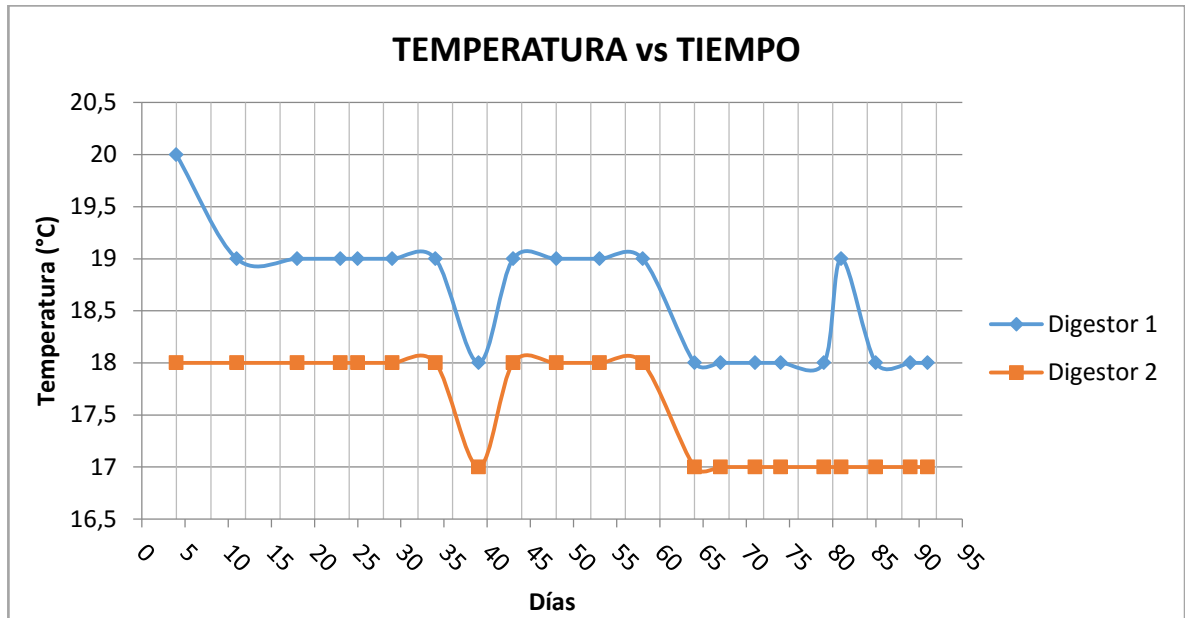
3.1.1 Temperatura. Con la temperatura ambiente se realizaron mediciones antes y durante el proceso con ayuda de un termómetro ambiental. Se obtuvo un promedio de temperatura ambiente de 15,5°C. Estos datos se muestran en el Anexo G; por otro lado, para promediar la temperatura interna en los digestores se tomaron registros semanales cada cuatro días. Estas mediciones se encuentran en el Anexo H.

Para analizar el comportamiento de la temperatura ambiente e interna en los digestores se tomaron datos a una misma hora y los resultados se observan en las gráficas 1, 2 y 3.

Gráfica 1. Temperatura ambiente 11:00AM.



Gráfica 2. Temperatura interna de los digestores a las 11:00AM.



Observando la gráfica 1, el comportamiento de la temperatura ambiente oscilo entre 12°C y 30°C, representando un promedio de 22,4°C. En cuanto a la gráfica 2, el digestor convencional (Digestor 1), tuvo temperaturas internas entre 18°C y 20°C y el nuevo prototipo (Digestor 2), se encontró entre 17°C y 18°C.

Con base en lo anterior y de acuerdo a datos bibliográficos, para el adecuado funcionamiento de un digestor, recomiendan que el tratamiento anaerobio se diseñe para que opere con variaciones de temperatura que no excedan los 0,6°C – 1,2°C/día⁶⁶; por lo que se puede indicar que del digestor 2, al tener únicamente 1°C de variación en su temperatura interna, se espera que su producción de biogás sea mejor en cantidad o calidad en comparación con el digestor 1, para el cual la temperatura varió en 2°C.

La variación que presenta el digestor 1, es debido a que estuvo expuesto a la intemperie, mientras que el digestor 2, al contar con el invernadero, obtuvo la protección necesaria para que su variación no superara los 1,2°C mencionados anteriormente.

Al comparar la temperatura ambiente de los digestores (Tabla 6) se observa que, a pesar de los cambios, ambos digestores mantuvieron su temperatura, es por esto, que se identificó que el proceso microbiológico dentro de los digestores proporciona la temperatura a la que se lleva a cabo la degradación biológica y así

⁶⁶ VARNERO MORENO, María T. Manual del Biogás. Gobierno de Chile Ministerio de Energía. Santiago de Chile. 2011.

mismo, las propiedades del material de los reactores también favorecen la estabilidad en la temperatura.

Tabla 6. Comparación de la temperatura interna y ambiental a las 5:00AM.

	TEMPERATURA (°C)
DIGESTOR 1	18 +/-0.02
DIGESTOR 2	17 +/-0.02
AMBIENTAL	11 +/-0.02

3.1.2 pH. En la etapa inicial del proceso de digestión anaerobia se realizaron dos mezclas estiércol-agua antes de la puesta en marcha del proceso, la primera haciendo uso de estiércol fresco y agua residual y la segunda se hizo con estiércol seco y agua residual; a las que se les determinó el pH, reportando un valor de 6,8 y 8,6 respectivamente, como se muestra en la ilustración 5 y 6. También se realizó para verificar la relación C/N, ya que a mayor contenido de carbono se presenta mayor acidez y por lo tanto un pH más alto como se observó para el estiércol seco, a diferencia del pH obtenido para el fresco, indicando que tiene mayor contenido de nitrógeno, otorgando alcalinidad a la mezcla y por lo tanto un pH cercano a la neutralidad. Es importante resaltar que al obtener un pH alcalino, indica mayor contenido de nutrientes.

De acuerdo a esto, se usó la mezcla del estiércol fresco para dar inicio al proceso ya que se obtuvo el pH cercano a la neutralidad.

Ilustración 5. Estiércol fresco.



Ilustración 6. Estiércol seco.



Para analizar en detalle el comportamiento del pH es necesario tener en cuenta los comportamientos en las diferentes fases de la digestión anaerobia; según datos bibliográficos el pH para la fase hidrolítica corresponde a 7.0-7.2, la acidogénica se encuentra entre 5.5 y 6.5, para la fase metanogénica entre 7.8 y 8.2 y para cultivos mixtos se encuentra entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el ideal⁶⁷. En conclusión el pH comienza gradualmente a aumentar al tiempo que los ácidos grasos se transfieren a la fase metanogénica y son consumidos por microorganismos metanogénicos⁶⁸.

Como se puede observar en la gráfica 4, el comportamiento de pH en el digestor 1 el arranque inicia en 7,2 indicando el inicio de la fase hidrolítica, posteriormente arroja valores entre 5.7 y 6.1 durante los primeros 40 días, lo cual permitió identificar el desarrollo de la fase acidogénica, seguido a esto, se observa como del día 45 al 85 el digestor opera con un pH entre 6,4 y 6,8.

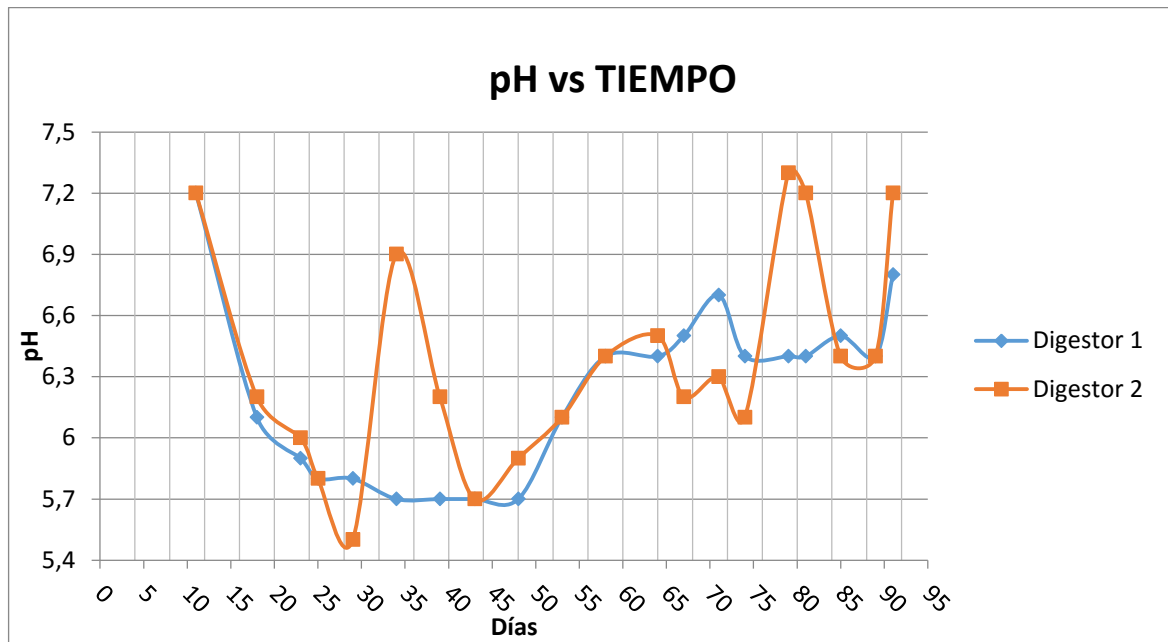
En cuanto al digestor 2 igualmente inicia con el pH en 7,2 para el desarrollo de la etapa hidrolítica, al transcurrir los primeros 20 días del proceso tuvo un comportamiento entre 5,5 y 6,2, permitiendo identificar la etapa acidogénica dentro del digestor; seguido, se presenta un aumento de 6,9 el día 25, posteriormente varía entre 5,7 y 6,5 del día 29 al 67 indicando aún la presencia de microorganismos acidogénicos. Finalmente se obtienen valores entre 6,4 y 7,3

⁶⁷ BITTON, G. Wastewater Microbiology. Weley-Liss, New York, USA. 1994.

⁶⁸ CORRAL, Maritza; SAMANI, Zohrab; HANSON, Adrian; SMITH, Geoffrey; FUNK, Paul; YU, Hui; LONGWORTH, John. Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure. Bioresource Technology 99. 2008. Page 8288–8293.

indicando el desarrollo de la fase metanogénica, representando una ventaja en cuanto a volumen de biogás generado sobre el digestor 1 al desarrollarse en menor tiempo esta última etapa.

Gráfica 3. Comportamiento del pH en los digestores.



Según estudios realizados en Chile, en el año 2.011 citado en el numeral 1.2.1, el pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás, sino también su composición; una de las consecuencias de que descienda el pH a valores inferiores a 6.0, es que el biogás que se produce sea pobre en metano, por tanto, tiene menores cualidades energéticas. Según esto, se esperaría que el biogás del digestor 2 no tenga la mejor capacidad energética, debido a su descenso en el pH al inicio del proceso; respecto al digestor 1, el biogás puede generarse en menor cantidad de acuerdo a que el pH llega a 6,8 al finalizar el proceso, impidiendo la realización de la etapa metanogénica dentro del digestor.

Es importante la relación entre el pH y la temperatura, ya que al tener temperaturas dentro del rango mesofílico y pH ácidos, quiere decir que los microorganismos presentes en los digestores realizan su proceso degradativo rápidamente generando acidificación y por tanto menor cantidad de gas metano. Por el contrario, si el pH es cercano a la neutralidad los microorganismos actuarán lentamente para degradar la carga orgánica facilitando el desarrollo de la etapa metanogénica y produciendo mayores cantidades de biogás.

Por lo anterior, se espera que el digestor 1 produzca menor cantidad de biogás con respecto al digestor 2 por sus correspondientes comportamientos en el pH, lo cual se verifica en los resultados de la cromatografía de gases.

3.1.3 Tiempo de retención hidráulica. Según la ecuación 12, presentada en el numeral 2.1.3, se obtiene un tiempo de retención de 66 días, indicando el tiempo en el que las bacterias ya han metabolizado los sólidos volátiles del sustrato, dando paso a la etapa metanogénica del proceso. Observando las gráficas 4 y 5 correspondientes al pH en el digestor 1 y 2, se demuestra que alrededor del día 66 inicia la etapa de producción del biogás.

$$TRH = -51,227 \text{ Ln}^*(15,5^{\circ}\text{C}) + 206,72$$

$$TRH = 66 \text{ días}$$

3.1.4 Caudal de entrada del efluente. Para obtener el caudal de entrada del afluente, es necesario conocer el volumen del reactor, el cual se seleccionó de acuerdo a las capacidades encontradas en el mercado.

Tabla 7. Capacidades de los tanques en el mercado.

30 L
60 L
130 L
155 L

El volumen seleccionado fue de 60L, ya que el proyecto se trabajó a escala banco. De acuerdo a la ecuación 13 del numeral 2.1.4, se obtiene un caudal de 0,63 mL/min. Debido a que el proceso no es continuo y se alimenta una sola vez, este caudal se calcula para el momento en que la mezcla se dirige al reactor.

Ecuación 17. Caudal de entrada del efluente.

$$Q = \frac{V_R}{TRH} = \frac{60 \text{ L}}{66 \text{ días}} * \frac{1000 \text{ mL}}{1440 \text{ min}} = 0,63 \text{ mL/min}$$

3.1.5 Volumen de materia orgánica. Según la sección 2.1.5 y teniendo en cuenta que el volumen del reactor es de 60L, quiere decir que el 70% de 60 L es 42 L, volumen de la mezcla que estará en el reactor. Ahora, recordando que la mezcla en el proceso debe cumplir con la relación (1:3) mencionada, quiere decir que la tercera parte de 42 L será el volumen de agua que deberá agregarse a la mezcla y por lo tanto el resto corresponde al estiércol como se detalla a continuación:

Ecuación 18. Volumen de materia orgánica.

$$V_L = 31,5 \text{ L}$$

$$V_E = 0,25 * 42 \text{ L}$$

$$V_E = 10,5 \text{ L}$$

Finalmente se obtiene que el volumen necesario de estiércol es 10,5 L y de agua 31,5 L, completando una mezcla de 42 L que se introduce al reactor.

3.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS DIGESTORES

3.2.1 Material y forma. El proceso de digestión se llevó a cabo en tanques de polietileno de alta densidad. En el mercado se encuentra el tanque de polietileno recuperado y original, su diferencia es el tipo de resina de la cual están hechos; el recuperado hace referencia a polietileno reciclable, también cabe resaltar que el original se utiliza en la industria de alimentos y el recuperado en la industria de los químicos, pero la dureza y grosor de ambos es igual. Debido a que se va a trabajar con estiércol se escogió el tanque de polietileno recuperado. Estos tanques son verticales, definiendo la forma del digestor que corresponde a su vez a la forma establecida para los reactores UASB.

3.2.2 Dimensiones de los digestores de flujo ascendente. Se obtienen a partir del volumen seleccionado, el cual se mencionó anteriormente. Así mismo, el reactor cumple con las siguientes especificaciones:

- Diámetro de la tapa: 60cm
- Altura del reactor: 60cm
- Ancho: 40cm

De acuerdo a las ecuaciones de la sección 1.4.1 y lo anterior se obtiene el área del reactor.

Ecuación 19. Área del reactor.

$$A_R = \frac{\pi(0.4 \text{ m})^2}{4} = 0.13 \text{ m}^2$$

Obteniendo el área del reactor, se procede a calcular los parámetros necesarios de un reactor UASB.

Ecuación 20. Carga hidráulica.

$$C_H = \frac{6,3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{día}}{0,13 \text{ m}^2} = \frac{4,84 \times 10^{-6} \text{ m}}{\text{día}}$$

Ecuación 21. Flujo másico.

$$F = 0,06 \text{ m}^3 * 0,042 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$F = 2,52 \times 10^{-3} \text{ kg DQO}/\text{día}$$

Ecuación 22. Velocidad de flujo en la campana.

$$V_R = 4 * \frac{4,84 \times 10^{-6} \text{ m}}{\text{día}} = 1,936 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{día}$$

3.2.3 Alternativa para la mejora del nuevo prototipo. Después de realizar una búsqueda bibliográfica, se encontraron las siguientes opciones para realizar la mejora al digester que como ya se mencionó, corresponde a estabilizar la temperatura interna.

Tabla 8. Características de los aislantes térmicos.

Recirculación externa de agua caliente	Espuma de poliuretano	Plancha de corcho
Poca resistencia, aumento de costo al calentar el agua. Implementación costosa ya que requiere de otro equipo.	Muy buena resistencia, puede usarse con resinas de fibra de vidrio. Su aplicación es relativamente sencilla. Costo razonable.	Disponible en muchos mercados; costo razonable. Tiene una menor resistencia que la del poliuretano.

Fuente. Documento Técnico de la FAO. 2008⁶⁹.

Según las características detalladas en la tabla 8, el material que presenta mayores ventajas y beneficios para estabilizar la temperatura es la espuma de rígida de poliuretano, por lo cual se realizó un recubrimiento en este material duroplástico, que tiene la ventaja de no ser fusible, presenta un alto punto de ablandamiento, y, por tanto, una buena estabilidad térmica; presenta adaptación a las forma de la materia prima, en este caso al aplicar la espuma de poliuretano en

⁶⁹ FAO. Documento técnico de pesca. El uso de hielo en pequeñas embarcaciones de pesca. ISSN 1014-1136. 2008. Página 72.

el contorno del digestor se adaptó a su forma cubriéndolo por completo y asegurando una mejor resistencia térmica.

También, según lo mencionado en la sección 2.2.3, se realizó un invernadero en el lugar donde se encuentra el digestor, se seleccionó el polietileno de alta densidad, el cual es derivado del poliuretano usado industrialmente para proporcionar al sitio condiciones de invernadero, y así asegurar mayor estabilidad en la temperatura del proceso.

3.2.4 Selección del tipo de almacenamiento para el biogás. Como se observa en la ilustración 7, el almacenamiento del biogás se realizó en gasómetros que cumplieran con las características especificadas en el numeral 2.2.4. Sus medidas son de alto 36 cm y diámetro 30 cm, obteniendo un volumen de $0,025 \text{ m}^3$.

Ilustración 7. Gasómetros utilizados para almacenar el biogás.



3.2.5 Selección y acondicionamiento de la instrumentación de las entradas y salidas. De acuerdo con el procedimiento que se detalla en el anexo B y lo descrito en numeral 3.2, los sistemas de digestión ensamblados y ubicados en la finca El Recodo se observan en la ilustración 8.

Ilustración 8. Construcción finalizada de los digestores.



3.2.6 Volumen de biogás esperado. El volumen de biogás estimado para el final del proceso en los digestores fue de $0,021 \text{ m}^3$.

$$V_{\text{Biogás Total}} = 1,36 * 0,27 * 42 \text{ L} = 20,97 \text{ L} = 0,021 \text{ m}^3$$

3.3 EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

En esta sección se analizan los resultados de las pruebas microbiológicas realizadas el día 22, los resultados de nutrientes, relación C/N, DQO, sólidos totales, volátiles y suspendidos; y cantidad de biogás generado.

3.3.1 Evaluación de la carga microbiológica. Con el fin de verificar la morfología de y corroborar que los microorganismos necesarios para el proceso estuviesen en la mezcla de los digestores para que ocurriera la degradación de la materia orgánica, se realizó una prueba de coloración de Gram el día 19 cuyo procedimiento se describe en el anexo J. Se realizó para el medio de cultivo BHI, el cual no tiene inhibidores y que de acuerdo a la ilustración 9 se verifica la existencia de bacterias Gram positivas y Gram negativas. También se realizó para carboximetil celulosa y almidón, para determinar que existieran microorganismos con enzimas para degradar la celulosa y el almidón y por lo tanto asegurar que exista la primera etapa de la digestión, la hidrólisis.

Ilustración 9. Resultado de la coloración Gram para los cultivos BHI, Carboximetil y almidón respectivamente.



3.3.2 Evaluación de la actividad enzimática de los microorganismos presentes en los digestores. Se realizaron pruebas para verificar la actividad enzimática celulolítica, proteolítica, lipolítica y amilolítica durante la fase hidrolítica del proceso de digestión. La prueba semi-cualitativa de actividad para cada uno de los medios anteriormente dichos, se realizó mediante la siembra en celulosa, leche, lignina y almidón, respectivamente, las cajas fueron incubadas a 30°C durante 48 horas. Luego de dicho tiempo realiza una observación para verificar si hay presencia de microorganismos que degraden estos medios de cultivo.

La enzima celulasa participa en el rompimiento de los enlaces glicosídicos β -1,4 presentes en los polisacáridos celulosa y hemicelulosa⁷⁰. La actividad enzimática celulolítica resultó positiva debido a que se nota como los microorganismos degradaron el medio, sin embargo fue poco comparado con los medios de almidón y leche. Dentro de los microorganismos degradadores de celulosa se encuentran las bacterias anaerobias *Acetivibrio cellulolyticus*, *Butirivibrio*, *Bacteroides cellulosolvens*, *Bacteroides succinogenes*, *Clostridium cellulovorans*, *Clostridium thermocellum*, *Ruminococcus albus*, *Ruminococcus flavefaciens* entre otros, corroborando una vez más la presencia de las bacterias necesarias para la degradación de materia orgánica.

Las proteasas, son enzimas que catalizan la hidrólisis de los enlaces peptídicos de las proteínas⁷¹. La actividad proteolítica se reflejó en los aros de degradación que se pueden observar en la ilustración 10, esto muestra la cantidad de microorganismos que se encuentran en la materia orgánica presente dentro de los

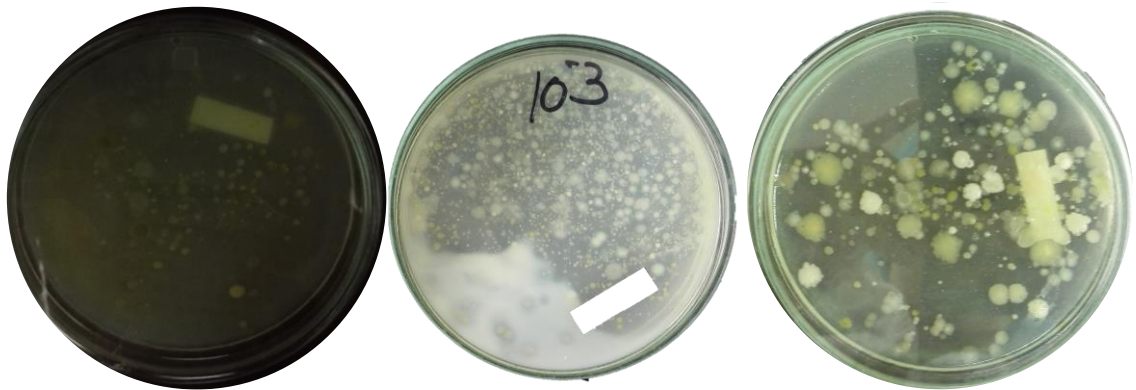
⁷⁰ BOHÓRQUEZ GUTIÉRREZ, Lina M; LOSADA RIVERA, Laura L. Estudio de la actividad enzimática celulolítica en la etapa termófila de una fermentación en estado sólido realizada a partir de residuos generados en el procesamiento industrial de Papa r-12. Universidad de la sabana. Facultad de ingeniería. Programa de producción agroindustrial Chía. 2004.

⁷¹ PÉREZ, Aurora; CARVAJAL, Carol; PINA, Danilo; TRUJILLO Reinaldo. Actividad proteolítica de extractos enzimáticos obtenidos de plantas de la familia Bromeliaceae. Universidad de Ciego de Ávila, Cuba. Revista Cubana Plant Med. 2006. Página 11.

reactores, teniendo así la capacidad de degradación para la producción de metano.

Al evaluar la actividad amilolítica, se observó que hubo gran degradación de almidón por bacterias, al igual que de la proteína. Como se puede observar en la ilustración 10 se forman aros de degradación que permiten distinguir como las bacterias inmersas en la materia orgánica tienen la capacidad de atravesar la fase hidrolítica con mejor eficiencia ya que el sustrato contiene gran cantidad de celulosa, amilasa y proteasas, por lo que los microorganismos presentes podrán degradar correctamente el sustrato.

Ilustración 10. Resultado para los medios de cultivo con celulosa, leche y almidón respectivamente.



Respecto al medio de lignina, debido a que es un compuesto más complejo para ser degradado por microorganismos se esperaron 72 horas. Al observar el resultado, como se puede observar en la ilustración 11, no ocurrió algún tipo de degradación en el medio, inicialmente esto sucede debido a que los hongos son los mayores degradadores de lignina y en reactores anaerobios no deben haber hongos, asegurando de esta manera el buen funcionamiento de los reactores.

Ilustración 11. Resultado para el medio de cultivo lignina.



3.3.3 Nutrientes y relación C/N. De acuerdo a los resultados de la tabla 8 y detallados en el anexo E, se analizó que el sustrato que ingresó a los digestores obtuvo un 65% de carbono orgánico oxidable, porcentaje significativo para que los microorganismos degraden la materia orgánica.

Según el estudio realizado por la UPME, cuando la relación C/N es baja, es decir, que el nitrógeno es abundante, este será liberado y acumulado en forma de amoníaco (NH₃)⁷². En cuanto a la relación C/N, se obtuvo un valor de 9,33, indicando una posible inhibición por la concentración de amoníaco en el sustrato.

Tabla 9. Resultados de nutrientes y relación carbono nitrógeno para el sustrato inicial.

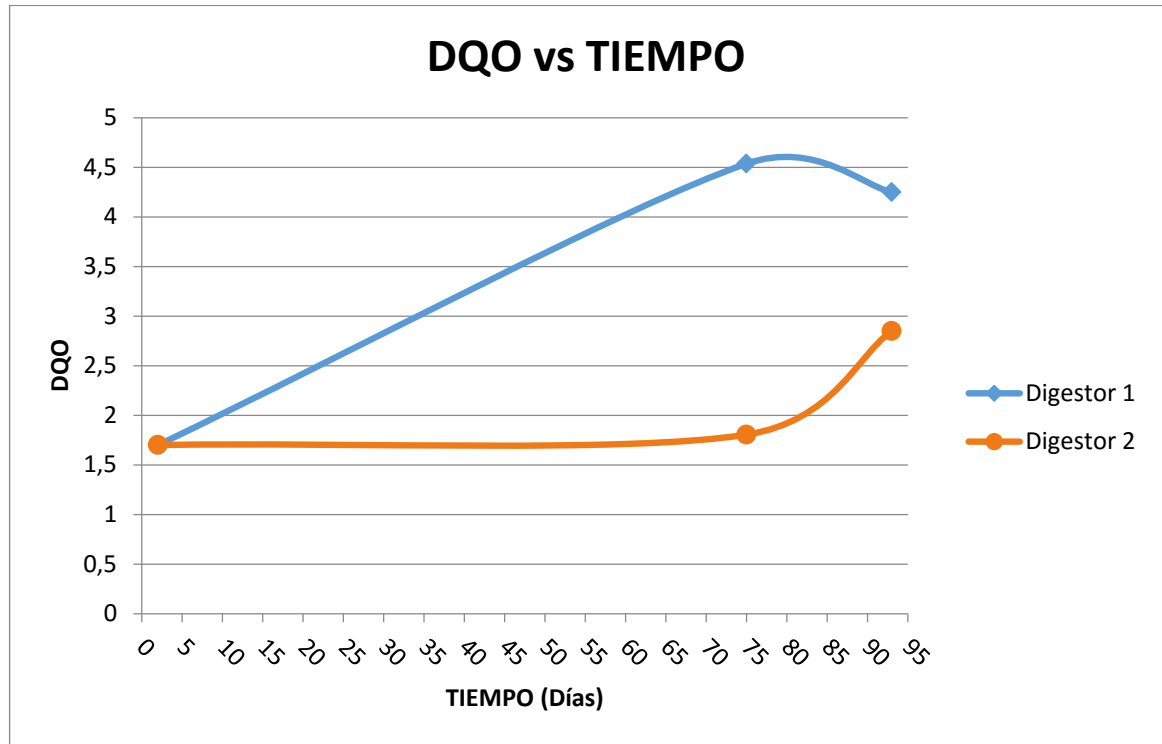
SUSTRATO BOVINO INICIAL					
DIA PROCESO	FECHA	NITROGENO TOTAL (%P/V)	FOSFORO TOTAL (%P/V)	CARBONO ORGANICO OXIDABLE (%P/V)	REL C/N
2	16/02/2016	0,07	0,008	0,65	9,33

3.3.4 DQO. Para analizar el comportamiento de la DQO, se tiene en cuenta que fue necesario llenar los digestores en su totalidad el día 53, debido a que por la salida del gas se detectó un olor a putrefacción indicando que el proceso no estaba trabajando bajo condiciones anaerobias. Al observar el aumento de la DQO en las gráficas 6 y 7, se infiere que al agregar un volumen de mezcla adicional ocasiona que el parámetro no disminuya como se espera, debido a que los microorganismos deben acoplarse a las características del medio nuevamente, es decir, que el arranque del proceso se da por segunda vez.

En las gráficas 6 y 7, se puede observar y determinar que el sustrato inicial obtiene el mismo valor en cada digestor, sin embargo, después de realizar el llenado el valor de la DQO aumenta casi tres veces en el digestor 1 en relación al 2, señalando mayor cantidad de materia orgánica a oxidar lo que dificulta la realización de la etapa metanogénica en el digestor 1. En el caso del digestor 2, al obtener valores de DQO menores, es decir, menor cantidad de oxígeno, se facilita la acción metanogénica de los microorganismos. Los resultados de esta prueba se encuentran en el Anexo E.

⁷² UPME. Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Documento ANC-0603-19-01. Marzo 2003. Página 17.

Gráfica 4. Comportamiento de la DQO en los digestores.



3.3.5 Sólidos suspendidos, volátiles y totales. Como se expresó anteriormente, el llenado provocó que el porcentaje de sólidos totales, volátiles y suspendidos aumentaran dentro de los digestores, sin embargo, de acuerdo a los resultados de las tablas 10 y 11, los valores del digester 2 son menores en comparación al digester 1, lo que indica mayor degradación dentro del reactor y a su vez generación de Biogás más rápida. Los resultados se encuentran en el anexo E.

Según el estudio realizado por Mosquera y Martínez, la concentración de sólidos puede llegar a contener entre 1%-10% de estiércol con una mezcla de agua residual, correspondiendo el 90% restante al agua con gran contenido de materia orgánica biodegradable⁷³. De lo anterior, los resultados obtenidos se encuentran en el rango de concentración adecuado para lograr la digestión.

⁷³ MOSQUERA CALLE, John Mario; MARTINEZ MARTINEZ, Beatriz Elena. Evaluación de la digestión anaerobia como alternativa de estabilización de biosólidos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Escuela de Química. Colombia, Pereira. 2012. Página 27.

Tabla 10. Resultados de sólidos para el digestor 1.

DIGESTOR 1				
DÍA	FECHA	SÓLIDOS	SÓLIDOS	SÓLIDOS
PROCESO		TOTALES	SUSPENDIDOS	VOLÁTILES
		(% P/P)	(% P/V)	(% P/P)
2	16/02/2016	1,7	0,98	1,36
93	17/05/2016	4,31	3,93	3,6

Tabla 11. Resultados de sólidos para el digestor 2.

DIGESTOR 2				
DÍA	FECHA	SÓLIDOS	SÓLIDOS	SÓLIDOS
PROCESO		TOTALES	SUSPENDIDOS	VOLÁTILES
		(% P/P)	(% P/V)	(% P/P)
2	16/02/2016	1,7	0,98	1,36
93	17/05/2016	3,38	3,18	2,76

3.3.6 Cantidad de biogás generado. El volumen de biogás obtenido fue de 0,015 m³ y 0,018 m³ para el digestor 1 y 2 respectivamente al día 101 del proceso. Valores que se determinaron a partir de la capacidad del gasómetro instalado para cada uno.

3.4 COMPARACIÓN DE LAS VARIABLES TIEMPO Y PRODUCCIÓN

En esta sección se describen y analizan los resultados de la cromatografía de gases que identifica el volumen de metano en cada digestor y los correspondientes resultados estadísticos para lograr comparar el tiempo y la producción de biogás en los sistemas.

3.4.1 Análisis físicos. Se realizó una cromatografía de gases para la producción de biogás en cada digestor, los resultados se muestran en la tabla 12 y se encuentran detallados en el anexo K.

Tabla 12. Resultados cromatografía de gases para cada digestor.

COMPUESTO	DIGESTOR 1	DIGESTOR 2
	% Volumen	% Volumen
Metano (CH₄)	58,3	64,2
Oxígeno (O₂)	14,2	10,7
Hidrógeno (H₂)	n.d*	n.d*

*n.d. No detectado, por debajo del límite de detección (<0,5% v/v)

Según lo obtenido, se verifica que el porcentaje de volumen de metano para el digestor 2 fue mayor un 9,19% en relación al 1, permitiendo asegurar que la calidad y cantidad de producción de biogás fueron mejor en el digestor 2. En cuanto al oxígeno, para el digestor 1 fue mayor 24,6% en relación al 2, es decir, que como el proceso se trabaja en condiciones anaerobias, en el digestor 1 se genera un retardo en la producción de biogás.

Respecto al tiempo, según lo mencionado en el numeral 3.3.6, al día 101 se obtiene mayor cantidad de biogás en el digestor 2, indicando que el tiempo de producción de biogás fue menor para el digestor 2 con respecto al digestor 1.

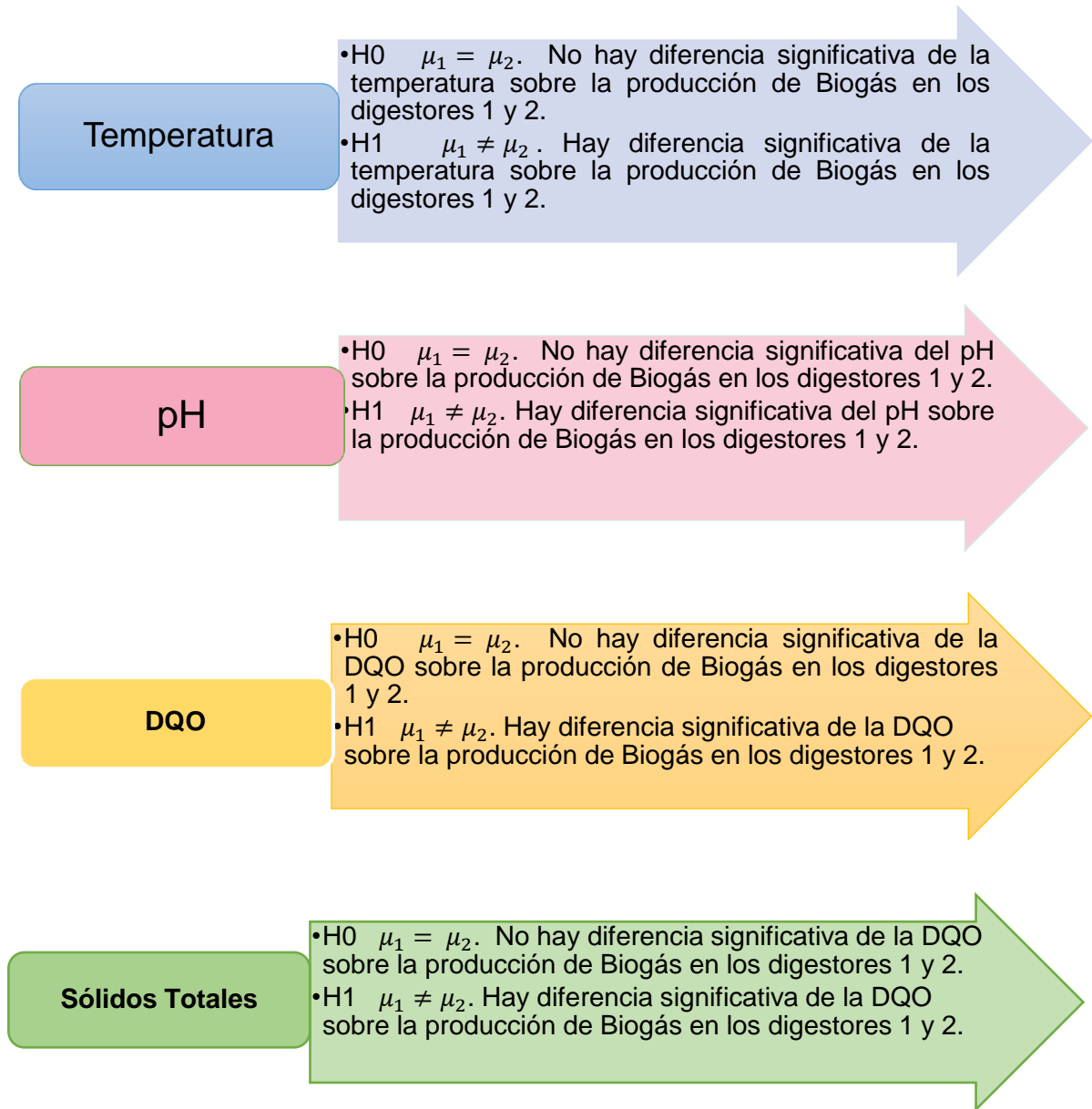
3.4.2 Análisis estadísticos. Para identificar la influencia de la temperatura, pH, DQO, y sólidos totales sobre el proceso en el digestor 1 y 2, se realizó un ANOVA por cada parámetro con un diseño balanceado. El análisis se realizó a un nivel de significancia de 0,05 y 0,025 dando un 90% de confiabilidad a los datos arrojados experimentalmente. Los datos que se tomaron para realizar la prueba se muestran en la tabla 13. El procedimiento detallado para realizar el ANOVA se encuentra en el Anexo L.

Tabla 13. Datos tomados para realizar el ANOVA.

DIA	DIGESTOR 1				DIGESTOR 2			
	TEMPERATURA	PH	DQO	SÓLIDOS	TEMPERATURA	PH	DQO	SÓLIDOS
1	20	6,1	1,7	1,7	18	6,2	1,7	1,7
25	19	6,1			18	6,1		
58	18	6,4	4,536		17	6,1	1,805	
73	18	6,8	4,25	4,31	17	7,2	2,85	3,38

Debido a que es un análisis de varianzas el cálculo se hace por medio de la distribución F. Las hipótesis planteadas para cada parámetro fueron las siguientes:

Ilustración 12. Hipótesis planteadas.



De acuerdo a las hipótesis planteadas los resultados fueron los siguientes.

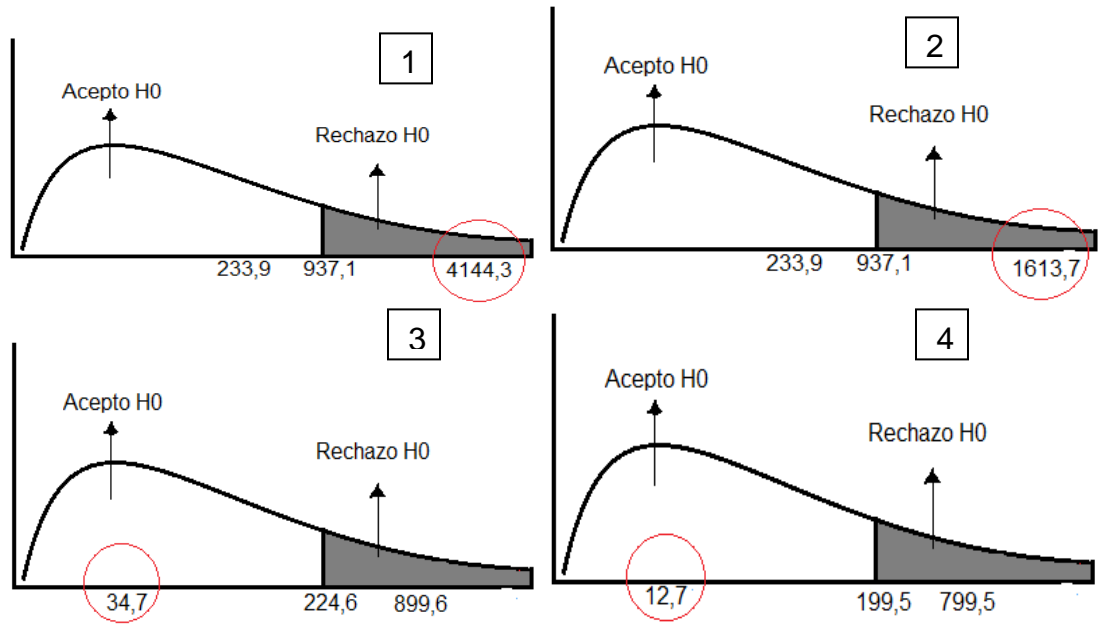
Tabla 14. Resultados de ANOVA para Temperatura, pH, DQO y sólidos totales.

	Fuentes de variacion	Sumas de cuadrados	G.L	Cuadrados nedios	F	
TEMP	SCT	2593,935547	7	370,562221	F Calculado	4144,297
	SCE	2590,185547	1	2590,185547	F Tablas (0.05)	233,99
	SCD	3,75	6	0,625	F Tablas (0.025)	937,11
	Fuentes de variacion	Sumas de cuadrados	G.L	Cuadrados nedios	F	
PH	SCT	321,2399219	7	45,89141741	F Calculado	1613,697085
	SCE	320,0499219	1	320,0499219	F Tablas (0.05)	233,99
	SCD	1,19	6	0,198333333	F Tablas (0.025)	937,11
	Fuentes de variacion	Sumas de cuadrados	G.L	Cuadrados nedios	F	
DQO	SCT	55,05972912	5	11,01194582	F Calculado	34,74548442
	SCE	49,37548179	1	49,37548179	F Tablas (0.05)	224,58
	SCD	5,684247333	4	1,421061833	F Tablas (0.025)	899,58
	Fuentes de variacion	Sumas de cuadrados	G.L	Cuadrados nedios	F	
SOLIDOS	SCT	35,30007773	3	11,76669258	F Calculado	12,65569681
	SCE	30,48282773	1	30,48282773	F Tablas (0.05)	199,5
	SCD	4,81725	2	2,408625	F Tablas (0.025)	799,5

De acuerdo a los resultados de la tabla 14 y la ilustración 13, la hipótesis nula se rechaza para temperatura y pH, es decir, que los dos parámetros tienen influencia sobre la producción de biogás en el proceso, corroborando de esta manera lo planteado teóricamente. En el caso de DQO y sólidos totales, la hipótesis nula se acepta, lo que significa que no afectan el proceso, debido a que su comportamiento se ve perjudicado por el llenado mencionado.

Al observar los resultados de la distribución F calculada a los dos niveles de significancia, se asegura que los datos del ANOVA son confiables para cada parámetro.

Ilustración 13. Resultados gráficos del Anova para temperatura (1), pH (2), DQO (3) y solidos (4).



4. INGENIERÍA BÁSICA PARA LA FINCA EL RECODO

En esta sección se desarrolla la ingeniería básica para la producción de biogás en la finca El Recodo, cubriendo las etapas y operaciones unitarias del proceso, teniendo en cuenta el diseño del digestor planteado como nuevo prototipo en este documento. También se presentará la viabilidad económica para su debida implementación a escala piloto.

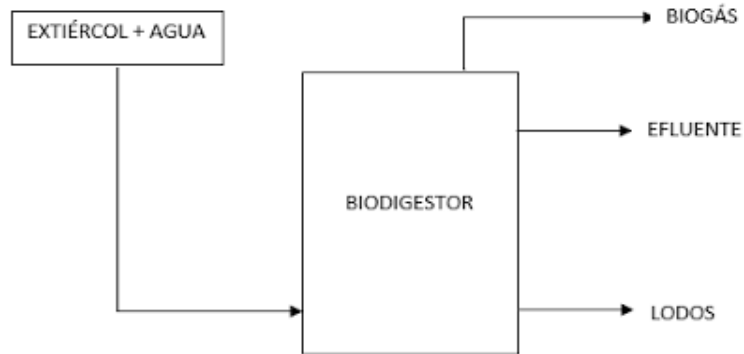
4.1 ETAPAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN.

4.1.1 Recepción y almacenamiento de la materia prima. La finca El Recodo cuenta con un sistema de gestión de materia orgánica, y consiste en reunir el estiércol bovino en el lugar de ordeño que tiene un ligero desnivel para facilitar la remoción del mismo moviéndolo con una pala y lavando con agua, para encausarlo hacia un canal hecho en la tierra y también con desnivel para acopiarlo en un sitio a campo abierto, no muy lejos del lugar de ordeño, al terminar esta actividad los desechos se transportan por canales hacia el lugar de acopio.

4.1.2 Acondicionamiento de los desechos orgánicos. Para que la producción de biogás esté en condiciones adecuadas se debe realizar un pre-acondicionamiento de la materia orgánica antes de dar inicio a la etapa de fermentación. Debe prepararse la mezcla de alimentación, la cual debe cumplir con una relación de 1:3 (estiércol:agua) y un pH entre 6,8 - 7,2 antes de introducirla al tanque de digestión. Esta mezcla será insertada al tanque de mezclado para dirigirla al tanque de fermentación.

4.1.3 Fermentación anaerobia. Después de obtener la mezcla que cumpla con el pH especificado se conduce al digestor como se observa en la figura 7 en el que se llevará a cabo el proceso anaerobio, se controlarán las variables de operación de temperatura, pH, caudal a la entrada y carga orgánica, haciendo ajustes si es necesario. Al finalizar la degradación completa, se descarga el tanque para dar inicio de una nueva operación.

Figura 7. Diagrama de bloques del proceso de producción de biogás a partir de estiércol bovino.



4.1.4 Cantidad de desechos generados en la finca. De acuerdo a datos bibliográficos una vaca adulta produce aproximadamente 8 Kg de estiércol fresco producido por cada 100 Kg de peso del animal, es decir, que el promedio de peso de cada vaca es de 300 Kg y la finca cuenta con 20 bovinos, la cantidad total que se produciría al día es:

Ecuación 23. Cantidad de estiércol generado en la finca.

$$\text{Estiércol} \frac{\text{kg}}{\text{día}} = \frac{8 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} * 300 \frac{\text{kg}}{\text{vaca}} = 24 \frac{\text{kg}}{\text{vaca} * \text{día}}$$

$$\text{Estiércol} \frac{\text{total}}{\text{día}} = 24 \frac{\text{kg}}{\text{vaca} * \text{día}} * 20 \text{ vacas} = 480 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Durante el paleo de recolección del estiércol se supone una pérdida del 25%, por lo cual la cantidad que se alimenta al digestor es de 360 Kg/día.

4.1.5 Dimensionamiento del volumen del digestor UASB. Inicialmente se debe calcular la cantidad de agua a añadir para diluir la mezcla, respecto a la relación estiércol:agua de 1:3, será de 360 X 3 = 1080 L, resultando una carga de alimentación de:

Ecuación 24. Carga de alimentación.

$$\text{Carga} \frac{\text{L}}{\text{día}} = 360 + 1080 = 1440 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

De acuerdo al estudio realizado en el capítulo 2 de la temperatura ambiente en la finca El Recodo, el promedio es de 15,5°C, se calculó un tiempo de retención de 66 días.

Recordando que el 70% del volumen del reactor es para la carga y el 30% para la producción del biogás, el volumen del reactor será:

Ecuación 25. Volumen total de la mezcla.

$$V_R = V_{carga} + V_{biogás}$$

$$V_R = 1440 + 617$$

$$V_R = 2057 \text{ L}$$

Ecuación 26. Diámetro y altura del digesor.

$$H_L = \frac{V_{mezcla}}{\frac{\pi D^2}{4}}$$

$$H_L = \frac{V_{mezcla}}{\frac{\pi H_L^2}{4}}$$

$$H_L^2 = \frac{1.44\text{m}^3}{\frac{\pi}{4}} = 1.833$$

$$H_L = 1.224 \text{ m} = D_R$$

Una vez conocido el diámetro se puede calcular la altura del reactor:

Ecuación 27. Altura del reactor.

$$H_R = \frac{V_R}{\frac{\pi D^2}{4}}$$

$$H_R = \frac{2.057\text{m}^3}{\frac{\pi * 1.224\text{m}^2}{4}}$$

$$H_R = 2.14 \text{ m}$$

Seguido de estos cálculos se procede a calcular los demás parámetros para el reactor UASB.

Ecuación 28. Flujo másico.

$$F = V_R * \text{Carga}$$

$$F = 2057 * 1440 \frac{\text{kgDQO}}{\text{Día}}$$

$$F = 296208 \frac{\text{kgDQO}}{\text{Día}}$$

Carga hidráulica. Para calcular la carga hidráulica es necesario calcular el área del reactor con el diámetro del mismo.

Ecuación 29. Carga hidráulica.

$$C_H = \frac{Q}{A_R}$$

$$A_R = \frac{\pi D^2}{4} = 1.18 m^2$$

$$Q = \frac{V_R}{THR} = \frac{2.057 m^3}{66 \text{ días}} = 0.031 \frac{m^3}{\text{día}}$$

$$C_H = \frac{0.031 \frac{m^3}{\text{día}}}{1.18 m^2} = 0.026 m/\text{día}$$

4.1.6 Volumen de biogás esperado. El volumen de biogás se estima por medio la ecuación 30, la cual tiene en cuenta la cantidad de sólidos volátiles en la mezcla y un factor de producción de biogás promedio encontrado en la literatura ⁽⁷⁴⁾.

Tabla 15. Factor promedio para la producción de biogás a partir de estiércol vacuno

Tipo de desecho	Producción de Biogás $\frac{m^3}{m^3 M.O * DÍA}$
Estiércol Vacuno	0,27

Fuente. Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación. 2008⁽⁷⁵⁾.

Ecuación 30. Volumen de biogás esperado en la finca.

$$PB = SV * 0,27 * V_M$$

$$PB = 1.36 * 0,27 \frac{m^3}{m^3 M.O * día} * 1.440 m^3 M.O$$

⁷⁴ GUEVARA VERA, Antonio. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaerobios rurales: Producción de gas y saneamiento de efluentes. Lima: División de salud y ambiente. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. 1999.

⁷⁵ HERRERO Jaime M. Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación. Cooperación técnico alemana. Bolivia. 2008.

$$PB = 0.5288 \frac{m^3 \text{ de biogas}}{\text{dia}}$$

La producción de biogás esperada para la finca El Recodo será de $0.5288 m^3$ de biogás diarios.

4.1.7 Equipos y accesorios para la implementación de la planta de biogás. Para la implementación del proceso de producción de biogás en la finca El Recodo se describirán a continuación los equipos y accesorios necesarios que permitan llevar a cabo el proceso de producción.

- Tanque de digestión. El proceso se llevará a cabo en un tanque de polietileno de alta densidad, su capacidad tendrá que ser de 2057 L, y así garantizar el buen funcionamiento del reactor de acuerdo a lo planteado durante el desarrollo del proyecto.
- Tuberías, válvulas y accesorios. Serán necesarios los elementos que se mencionan en la tabla 16 para adaptarse al reactor.

Tabla 16. Accesorios, tuberías y válvulas necesarios para la construcción del reactor de la finca El Recodo.

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	Tubería PVC de 4" X 6m
3	Registros de PVC de 4"
1	Codo PVC de 4"
1 L	Soldadura PVC
1 L	Limpiador PVC
1	Cinta teflón
1	Registro de gas 1/2"
1	Manguera gas 1/2" x 3m
1	Embudo industrial
3	Flanches de 4"
1	Termómetro bimetálico 24"
1	pHmetro

- Tanque de mezcla. Se requiere de un tanque de mezcla en el cual se deposita la mezcla inicial que será enviada al tanque de digestión. Este tanque debe tener una capacidad igual al volumen de mezcla determinado anteriormente. Igualmente se debe fijar el tanque a la tubería que se dirige al reactor.

- Almacenamiento del biogás. Se debe hacer uso de un gasómetro para el almacenamiento del biogás, el cual debe tener una capacidad mayor a la producción de biogás estimada calculada para la finca.

4.1.8 Alternativa térmica para la finca El Recodo. Según estudios anteriormente referenciados, el biogás puede ser usado como fuente de energía eléctrica o térmica para satisfacer diferentes necesidades. La finca El recodo aprovechará el beneficio energético renovable del biogás como fuente térmica, el cual le generará beneficios económicos.

Según lo mencionado en la sección 1.5.1, la finca mensualmente consume 30Lb en la casa principal. Para determinar la cantidad de biogás que se generará al implementar el proceso de digestión, es necesario conocer el poder calorífico del combustible propano y el biogás para determinar la cantidad de biogás que iguala el poder calorífico del propano.

Tabla 17. Poder calorífico del propano y el biogás.

Combustible	Poder calorífico (kcal/m ³)
Propano	22052
Biogás (70% CH ₄ , 30 % C ₀₂)	6200

Fuente: Los digestores, energía y fertilizantes para el desarrollo rural. 1987⁷⁶

Así, las 30 Lb de gas propano corresponden a 7.632m³, que a su vez indica que diariamente la finca gasta 0.2544m³ de gas; por lo tanto se calcula el consumo energético diario de propano para la finca con la ecuación 28.

Ecuación 31. Energía consumida de propano.

$$E_{C_2H_8} = C_{p_{C_3H_8}} * Consumo$$

$$E_{C_2H_8} = 22052 \frac{KCal}{m^3} * 0.2544m^3$$

$$E_{C_2H_8} = 5610.03 KCal$$

Una vez calculada la cantidad energética que se consume en la finca de gas propano, se procede a calcular la cantidad de biogás que supliría dicha cantidad por medio de la ecuación 32.

⁷⁶ BAQUEDEANO, Manuel; YOUNG, Medina. Los digestores, energía y fertilizantes para el desarrollo rural. Valparaíso. Chile. Cetal ediciones. 1987.

Ecuación 32. Volumen de biogás consumido en la finca.

$$V_{biogás} = \frac{E_{C_2H_8}}{Cp_{biogás}}$$

$$V_{biogás} = \frac{5610.03 KCal}{6200 \frac{KCal}{m^3}}$$

$$V_{biogás} = 0.905 m^3$$

Teniendo en cuenta que la finca El Recodo, produciría 0,59 m³ de biogás y mensualmente gasta 0.905 m³, se puede decir que la implementación del sistema de digestión cubrirá un 66% de los gastos térmicos de la finca; aunque no es el 100% esto disminuiría gastos para la finca y el proceso de digestión produciría abono con mejores propiedades que benefician el ganado y terreno.

4.1.9 Impacto ambiental del proceso de digestión. La importancia y las ventajas de la aplicación de este tipo de tecnologías se observa en la mejora de la calidad de vida de las personas y del ambiente. Los olores y patógenos eliminados. A partir de los desechos orgánicos se obtiene un recurso energético de valor con el que puede producirse calor y electricidad, reemplazando a los combustibles fósiles. Los residuos generados por las explotaciones agropecuarias se convierten de esta forma en materias primas renovables y disponibles en la región. Igualmente la implementación de estos sistemas aportan beneficios económicos como:

- Ahorro de combustibles fósiles y ahorro en fertilizantes inorgánicos, ya que el efluente del digester es un fertilizante orgánico líquido.
- Extracción del potencial energético de desechos agrícolas evitando su emisión directa en la atmósfera y protegiendo así el medio ambiente de los efectos nocivos de los gases de efecto invernadero.
- Otro beneficio ambiental importante de las plantas de biogás es la significativa reducción de la presión sobre los rellenos sanitarios.
- Contribución a la protección de las aguas subterráneas, reduciendo el riesgo de lixiviación de nitratos.

4.1.10 Riesgos de seguridad asociados al proceso. Riesgos asociados a la materia prima. El estiércol bovino contiene gran número de nuevos genes de bacterias resistentes a antibióticos que se desarrollan en los intestinos de estos rumiantes y ponen en peligro a los seres humanos. Según estudios previos, hay bacterias directamente transmitidas por contacto entre los animales de granja y los

humanos que se ocupan de ellos⁷⁷.

- Riesgos del proceso. Durante el funcionamiento del sistema de digestión deben tenerse en cuenta los siguientes avisos:
 - El digestor debe encontrarse cercano a la zona donde se recoge el sustrato de partida y a la zona de consumo.
 - Se debe mantener el reactor a una temperatura constante.
 - Es posible que como subproducto se obtenga SH_2 , el cual es tóxico y corrosivo, dependiendo del sustrato de partida y de la presencia o no de bacterias sulfato reductoras. La presencia de SH_2 hace que se genere menos CH_4 , disminuyendo la capacidad calorífica del biogás y encareciendo el proceso.
 - Requiere de un trabajo diario y constante, sobre todo para la carga de la materia orgánica.
 - Es importante saber que debido a la baja velocidad de crecimiento de los microorganismos la puesta en marcha del proceso es lenta.
 - Los costos de operación y mantención no son altos, solo requiere personal capacitado, para que realicen las labores de mantención, que por lo general no son muy frecuentes.
 - Se debe asegurar que el sistema por donde circula el biogás no tenga ninguna fuga, principalmente porque este puede estar contaminado con algunos gases que afectan la salud y en segunda instancia se verá contaminado el ambiente con el metano.

⁷⁷ HERRERA, Adriana. El estiércol de vaca, reservorio de bacterias resistentes a los antibióticos: El gran temor es que se manifiesten en agentes patógenos responsables de intoxicaciones alimentarias o infecciones hospitalarias. En: El Nacional: Caracas, Venezuela: 23 de Abril de 2014. Ciencia y ambiente.

5. CONCLUSIONES

- De acuerdo al análisis realizado en cuanto a los parámetros que afectan el proceso de digestión anaerobio, se determinó que para la correcta operación tanto del sistema de digestión anaerobio convencional como para el nuevo prototipo, las condiciones de operación son temperatura, pH, tiempo de retención hidráulica, caudal de entrada del afluente y volumen de carga de materia orgánica; de las cuales las más importantes y que representaron una influencia determinante sobre el proceso fueron temperatura y pH, puesto que variaciones significativas en el sustrato afectan el crecimiento de los microorganismos encargados de realizar el proceso degradativo de la materia orgánica para la producción del biogás.
- Considerando los parámetros descritos, se determinó que el reactor U.A.S.B cumple con condiciones en cuanto a diseño y operación para realizar el proceso de digestión anaerobio, razón por la cual se implementó en la construcción a escala banco tanto para el sistema de digestión anaerobio convencional como para el nuevo prototipo, estableciendo una modificación en el nuevo prototipo con base en la estabilidad de la temperatura, que consistió en un recubrimiento en espuma de poliuretano por sus ventajas en cuanto a resistencia térmica y bajo costo, debido a que es el único parámetro que podía ser modificado externamente y es el más relevante al afectar directamente la degradación del medio y por ende la producción del biogás.
- Se evaluó la producción de biogás en cada digester, por medio de una prueba de laboratorio al sustrato inicial para conocer su composición en cuanto a nutrientes, carbono orgánico oxidable y relación C/N; obteniendo como resultados valores significativos para dar lugar a la digestión. Por otra parte, se realizaron pruebas microbiológicas, permitiendo identificar la existencia de microorganismos que degraden componentes celulolíticos, amilolíticos y proteolíticos, asegurando la degradación de la materia orgánica dentro de los digestores y tener certeza en la producción de biogás. Finalmente al analizar los parámetros DQO y sólidos se refleja la diferencia en cantidad de un digester al otro, significando un beneficio en el nuevo prototipo.
- De acuerdo a la prueba de cromatografía de gases realizada al biogás obtenido en cada digester, la cantidad de metano obtenida fue de 58,3%Vol y 64,2%Vol para el digester convencional y nuevo prototipo respectivamente, permitiendo asegurar que la calidad y cantidad en el digester modificado fue mayor. Adicionalmente, el análisis estadístico afirmó que la temperatura y el pH tienen influencia sobre el sistema de digestión anaerobio. Según esto, al comparar los dos sistemas planteados, se concluye que la mejora propuesta para estabilizar

la temperatura tuvo un efecto positivo y fue determinante para que la producción y calidad del biogás fuera mayor en el nuevo prototipo.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar el proceso de digestión anaerobio con las características del nuevo prototipo a escala industrial en la finca El Recodo, para aprovechar el residuo bovino y lograr una sostenibilidad utilizando el biogás como fuente térmica para la misma.
- Se recomienda realizar una investigación alterna, buscando algún microorganismo que se adapte a las condiciones del proceso de digestión anaerobio, que se adicione al sustrato y sea capaz de acelerar el proceso.
- Se recomienda analizar una alternativa para implementar al sistema de digestión el mezclado, previniendo el aumento de costo de implementación del proceso, asegurando una velocidad constante para beneficiar la degradación de materia orgánica dentro del reactor.
- Se recomienda realizar el estudio económico que requiere la implementación del proceso de digestión anaerobio a escala piloto y así mismo buscar la reducción de costos en materiales, equipos y operarios que sean necesarios.
- Se recomienda realizar un estudio de la digestión anaerobia agregando al sustrato otro residuo, ya sea agrícola o sólido generado en la finca para analizar los resultados que se obtendrían en cuanto a calidad y cantidad de biogás.
- Se recomienda a partir de los resultados de este proyecto, establecer en futuros proyectos el proceso de purificación de biogás para que pueda ser empleado posteriormente en motores u otros sistemas de generación de energía eléctrica, debido a que puede obtener metales pesados y compuestos tóxicos en porcentajes mínimos, pero capaces de causar daños a la salud humana.
- Se recomienda a futuros proyectos encargarse del estudio en la generación de energía eléctrica a partir del biogás producido en la finca El Recodo verificando que los costos no devalúen la producción de biogás.
- Para un análisis a través de un supuesto de normalidad se recomienda realizar nuevas mediciones de la composición del biogás para el análisis del efecto de las variables sobre la producción de biogás.

BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR ALVAREZ, Gustavo. Control de temperatura y pH aplicado en biodigestores modulares de estructura flexible con reciclado de lodos a pequeña escala. Universidad Autónoma de Querétaro. México. 2013. Página 31.

ARAGAW Tamrat; ANDARGIE Mebeaselassie; GESSESSE Amare. Co-digestion of cattle manure with organic kitchen waste to increase biogas production using rumen fluid as inoculums. International Journal of Physical Sciences. March 2013 Vol.8 (11), Page. 443-450.

ARBOLEDA, Yeison; SALCEDO GONZALEZ, Luis Octavio. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. Julio 2009.

BAQUEDEANO, Manuel; YOUNG, Medina. Los digestores, energía y fertilizantes para el desarrollo rural. Valparaíso. Chile. Cetal ediciones. 1987.

BAUTISTA, Alejandro. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Leganés. 2010. Página 19, 20, 22, 24, 37, 43.

BITTON, G. Wastewater Microbiology. Weley-Liss, New York, USA. 1994.

BOHÓRQUEZ GUTIÉRREZ Lina M; LOSADA RIVERA Laura L. Estudio de la actividad enzimática celulolítica en la etapa termófila de una fermentación en estado sólido realizada a partir de residuos generados en el procesamiento industrial de Papa R-12. Universidad de la sabana. Facultad de ingeniería. Programa de producción agroindustrial. Chía. 2004.

BOTERO, R; PRESTON, T. R. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización. Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV). Cali, Colombia. 1987.

CAICEDO. M, Francisco J. Diseño, construcción y arranque de un reactor U.A.S.B. piloto para el tratamiento de lixiviados. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. Página 8. 2006.

CALDERA, Yaxcelys; MADUEÑO, Pedro; GRIBORIO, Alonso; FERNANDEZ, Nola; GUITIERREZ, Edixon. Effect of the organic load in the performance the UASB reactor treating slaughterhouse effluent. En: Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad de Zulia. Agosto, 2005. Vol. 28, no. 2. ISSN 0254-0770.

CEPEDA PATIÑO, Leidy Andrea; VALENCIA CÁRDENAS, Sandra Patricia. Aislamiento de bacterias lipolíticas y determinación de patógenos humano *Escherichia coli* y *Salmonella sp.* A partir de residuos orgánicos domiciliarios en compostaje. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias. Microbiología industrial. Bogotá. Diciembre. 2007.

CHAMY, Ronaldo; VIVANCO, Elba. Potencial de biogás. Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás. Escuela de Ingeniería Bioquímica, PUCV. Santiago de Chile. Septiembre. 2007.

CHANG, F; LIN C. Biohydrogen production using an up-flow anaerobic sludge blanket reactor. International journal of hydrogen energy. 2004. Page. 33 – 39.

CHUKWUMA E; ORAKWE L. Anaerobic co-digestion of cattle paunch manure and cow dung for biogas production. Journal of Agricultural & Biological Science. June 2014, Vol. 9 Issue 6. Page 953.

CORRAL, Maritza; SAMANI, Zohrab; HANSON, Adrian. SMITH, Geoffrey. FUNK, Paul. YU, Hui. LONGWORTH, John. Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure. Bioresource Technology 99. 2008. Page 8288–8293.

CUASQUER H, Roberto A. Efectos de la aplicación de tres niveles de abonos orgánicos en el cultivo haba en la zona de Cuesca, provincia del Carchi. Universidad Técnica de Babahoyo. Facultad de ciencias agropecuarias. Escuela de ingeniería agronómica. El Ángel – Ecuador. Página 19. 2013.

DELGADO AYALA, José Luis; OTERO FLOREZ, Julián Alberto. Diseño, construcción y operación de un sistema biológico UASB a nivel piloto para el tratamiento de los lixiviados producidos en el relleno sanitario del municipio de San Gil. Universidad industrial de Santander, Facultad de ingenierías. Bucaramanga. 2008.

ELMITVALLI, Tarek. Treatment of municipal wastewater in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. Web based training. 2005. Page 3.

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. 154 Roma. 2008. Página 2-4.

FAO. Documento técnico de pesca. El uso de hielo en pequeñas embarcaciones de pesca. ISSN 1014-1136. 2008. Página 72.

GARCIA, M; PEREZ, M. Anaerobic co-digestion of cattle manure and sewage sludge: influence of composition and temperature. International Journal of Environmental Protection. June 2013, Vol. 3 Iss. 6, PP. 8-15

GARCÍA, Lisbet; SUÁREZ, Yolanda E; HERNÁNDEZ, Rodolfo O; BETANCOURT, Alexander. Estiércol bovino Mitos y realidades. En: Revista Asociación Cubana de Producción Animal (ACPA). No. 4. 2009. ISSN 0138-6247.

GUERRA M, Francisco J. Caracterización de aguas residuales. Laboratorio de Ingeniería ambiental. Universidad Iberoamericana Ciudad de México. México. D. F. Página 7. 2008.

GUEVARA VERA, Antonio. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaerobios rurales: Producción de gas y saneamiento de efluentes. Lima: División de salud y ambiente. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. 1999. Página 11.

HAMED M, Zeeman G; WILKO K.P, Gerard P. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure. Faculty of Agriculture, Mansoura University, E1-Mansoura, Egypt. Bioresource Technology 95. 2004. Page.191–201.

HASSAN, Rauf. Anaerobic digestion of sewage sludge and cattle manure for biogas production: influence of co-digestion. International Water Technology Journal. Volume 4. N.2. June 2014.

HASSAN, Rauf. Improvement anaerobic digestion performance of sewage sludge by co-digestion with cattle manure. International Journal of Scientific Research in Agricultural Sciences. 2015 Volume 2. Page. 173-177.

HERRERA, Adriana. El estiércol de vaca, reservorio de bacterias resistentes a los antibióticos: El gran temor es que se manifiesten en agentes patógenos responsables de intoxicaciones alimentarias o infecciones hospitalarias. En: El Nacional: Caracas, Venezuela: 23 de Abril de 2014. Ciencia y ambiente.

HERRERO, Jaime M. Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación. Cooperación técnico alemana. Bolivia. 2008.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas colombianas para presentación de tesis, trabajo de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 110 p.

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 38 p.

_____. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 4490. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 30 p.

KOCH, Alma; NARANJO, Blanca; PAÉZ, Maritza. Determinación de la actividad enzimática de lacasas y lignina peroxidasas de hongos degradadores de colorantes seleccionados para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Escuela Politécnica del Ejército. Laboratorio de Microbiología. Biotecnología. Departamento de ciencias de la vida. Ecuador. 2011.

LOBATO F, Álvaro. Estudio de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos con otros substratos agroindustriales. Universidad de León. Instituto de medio ambiente, recursos naturales y biodiversidad. Área de Ingeniería Química. León. 2012. Página 36.

LORENZO, Yaniris; OBAYA, Ma. Cristina. La digestión anaerobia y los reactores U.A.S.B. Generalidades. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA), vol. XL, no. 1, Enero-Abril, 2006, pp. 13-21. ISSN: 0138-6204

MÁRQUEZ VÁZQUEZ, Marjorie; MARTÍNEZ GONZÁLEZ, Sergio A. Reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA's o UASB) Antología. Centro Tecnológico Aragón. México. 2011. Página 26.

MEJIA SANCHEZ, G. Digestión anaerobia. Universidad Autónoma de Yucatán. Páginas 41-53.

Methods for chemical analysis of water and wastes. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, 1983.

MINISTERIO DE ENERGÍA. Manual del biogás. Proyecto CHI/00/G32. Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. Chile. 2011. Página 21, 22, 30, 38, 43.

MOESTEDT Jan; PÅLEDAL Sören N; SCHNÜRER Anna; NORDELL Erik. Biogas production from thin stillage on an industrial scale - experience and optimization. Journal Energies. 2013. 6. Page 5642-5655.

MOSQUERA CALLE, John Mario; MARTINEZ, Beatriz Elena. Evaluación de la digestión anaerobia como alternativa de estabilización de biosólidos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Escuela de Química. Colombia, Pereira. 2012. Página 27.

OSORIO. S, Jairo A.; CIRO. V, Héctor J.; GONZALES. S, Hugo. Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío. Universidad Nacional de

Colombia. En: Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín. Vol. 60. ISSN 0304-2847. Medellín, Colombia. Septiembre 14 del 2007.

PARÉZ, R; JUÁREZ, A. Bioquímica de los microorganismos. Ed Reverte. Página 324.

PARRA HUERTAS, Ricardo Adolfo; CAMPOS MONTIEL, Rafael Germán. Treatment of acid whey in a UASB reactor at different constant and punctual charges. En: Revista Producción + Limpia. Julio- Diciembre, 2003. Vol. 8, no. 2, ISSN 1909-0455.

PARRA. O, Brayan; TORRES. L, Patricia; MARMOLEJO. R, Luis Fernando; CÁRDENAS, Lina Marcela; VÁSQUEZ, Carlos; TORRES, Wilmar; OROÑEZ José. Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. U.D.C.A. Colombia. 2014.

PASOLAC. Guía Técnica de Conservación de Suelos y Agua. [Citado el 25 de Enero del 2016]. Disponible en internet:<http://www.funica.org.ni/docs/conser_sueyagua_49.pdf>.

PASSEGGI, Esteban; MAGTER MV STAMATTI, Guillermo. Guía para proyectos de biodigestión en establecimientos agropecuarios. Universidad Católica de Santa Fe. Facultad de Ciencias de la Tierra y del ambiente. Argentina. Diciembre 2008.

PÉREZ Aurora, CARVAJAL Carol, PINA Danilo, TRUJILLO Reinaldo. Actividad proteolítica de extractos enzimáticos obtenidos de plantas de la familia *Bromeliaceae*. Universidad de Ciego de Ávila. Cuba. En: Revista Cubana Plant Med. 2006. Página 11.

PINOS R, Juan M; GARCÍA L, Juan C; PEÑA A, Luz Y. Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. Instituto de Zonas Desérticas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). México. 2012.

RIVERA VALDERRAMA, María Fernanda; DE LA ROSA PORRAS, Cesar Claudio. Desarrollo de la ingeniería básica del sistema de producción de biogás a partir de estiércol de ganado vacuno de la finca Sierra Morena a escala de planta piloto. Fundación Universidad de América. 2009. Página 30, 31, 32.

RUIZ, I; SOTO A; VEIGA, M; LIGERO, P. Performance of and biomass characterization in a UASB reactor treating domestic waste water at ambient temperature. Department of Fundamental and Industrial Chemistry, University of a Coruña, a Zapateira s/n, 15071 a Coruña, Galiza (Spain). ISSN 0378-4738. Water SA. Vol. 24 No. 3 July 1998. Page 216.

SÁNCHEZ E, Borja R; TRAVIESO L, Martín A; COLMENAREJO M. Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste. *Bioresource Technology* 96. 2005. Page. 335–344.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 19 ed., New York, 1995. Page 5-16.

SUN Li; POPE Phillip B; EIJSINK Vincent G; SCHNÜRER Anna. Characterization of microbial community structure during continuous anaerobic digestion of straw and cow manure. *Microbial biotechnology journal*. 8 de Septiembre de 2015; 8(5). Page 815–827.

UPME. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Colombia. 2008. Página 118-125.

UPME. Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Documento ANC-0603-19-01. Marzo 2003. Página 17.

VARNERO MORENO, María T. Manual del Biogás. Gobierno de Chile Ministerio de Energía. Santiago de Chile. 2011.

VIVES DE ANDRÉIS, 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 (INVERMAR). Colombia. 2003. Páginas 30-34.

WATTIAUX, Michel A; ARMENTANO, Louis E. Metabolismo de carbohidratos en vacas lecheras. Instituto Babcock. 1999. Página 9. [Citado el 1 de Febrero de 2016]. Disponible en: <https://ganaderiasos.files.wordpress.com/2015/03/metabolismo-de-carbohidratos-en-vacas-lecheras.pdf>


WATTIAUX, Michel A; ARMENTANO, Louis E. Metabolismo de lípidos en vacas lecheras. Instituto Babcock. 1999. Página 14. [Citado el 1 de Febrero de 2016]. Disponible en: <<https://ganaderiasos.files.wordpress.com/2015/03/metabolismo-de-lipidos-en-las-vacas-lecheras.pdf>>

YANK L, Marina. Estudio de la producción de biogás en función de la cantidad de residuos de madera en un biodigestor tipo de carga única o batch. Universidad Nacional de Nordeste. Grupo de investigación en Energías Renovables (GIDER). Departamento de Termodinámica. Facultad de Ingeniería. Chaco, Argentina. 2005. Página 2.


ANEXOS

ANEXO A.
INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN


● TERMÓMETRO AMBIENTAL

	CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
	Tamaño	Jumbo
	Rango de temperatura	-40+50°C
	Resolución	1°C
	Tipo de columna	Columna de alcohol rojo
	Tipo de regleta	ABS
	Tipo de orificio	Para colgar en pared
	Dimensiones	398x63mm
	Empaque	Individual tipo blíster
	Marca	BRIXCO


● TERMÓMETRO BIMETÁLICO

	CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
	Diámetro de carátula	3"
	Rango de temperatura	-20+120°C
	Largo del bulbo	6"
	Conexión	½ NPT
	Ángulo	90° atrás
	Material	Acero inoxidable
	Marca	ROCKAGE

● PHMETRO

	CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
	Pantalla	Simple
	Rango	0.0-14.0
	Resolución	0.1 pH
	Precisión	0.1 pH
	Alimentación	4*1.5V Micro baterías alcalinas
	Auto apagado	Después de 6 minutos sin operación
	Calibración	NA
	Protección	IP67
	Marca	OHAUS

- MANÓMETRO

	CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
	Referencia	1100 Caja negra
	Rango	0-60 psi
	Precisión	+/-2.5% Full escala
	Conexión	Trasera 1/4
	Material caja	Acero negro
	Material Visor	En vidrio
	Material conexión	Bronce tubo burdón en latón
	Marca	RITHERM

ANEXO B. PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN DE LOS DIGESTORES

Para el siguiente procedimiento los instrumentos y materiales utilizados se relacionan detalladamente en el Anexo H.

• DIGESTOR CONVENCIONAL

1. Una vez comprado el bidón polietileno de 60L, se perforaron orificios de $\frac{3}{4}$ " en la parte inferior por los dos costados para la entrada y salida; y en la tapa ubicada en la parte superior para la salida del biogás. Por último, en uno de los costados se realiza un orificio de $\frac{1}{2}$ " para el termómetro bimetálico.
2. Perforados los orificios, se adaptan flanches en cada uno de ellos, debido a que tienen sellos internos que evitan escapes de líquidos y permiten conectar y asegurar la tubería hacia el tanque; son fijados por medio de la rosca interna que tienen a la cual se le puso cinta teflón. La salida de los flanches hacia la tubería es de tipo hembra en rosca, por lo cual fue necesario adaptarles conectores que por un costado fueran de conexión macho en rosca y por el otro de conexión hembra lisa.
3. Se dispone a cortar la tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ " de acuerdo a las medidas establecidas en la figura 5. Se une a los conectores tipo hembra lisa usando limpiador y pegamento para PVC. De igual manera se hace uso de codos de 90° para la unión de tuberías y registros para controlar la entrada y salida.
4. El termómetro bimetálico tiene conexión de rosca macho de $\frac{1}{2}$ ", por lo que se acopla directamente al flanche del mismo diámetro usando cinta teflón.
5. Para el tanque se mezcla se usaron baldes de 5 gal a los que se le perforó un orificio central en el fondo, en donde se conectó la tubería de entrada haciendo uso de pegamento para PVC y silicona.
6. De acuerdo a la construcción establecida para un reactor UASB, el reactor en su interior cuenta con una campana, para este caso, se usó un embudo que permitiera su simulación, este se adaptó a la tapa del tanque con ayuda de un flanche.
7. Para la salida del biogás, se conecta la manguera del gas que tiene conexión de rosca macho directamente al flanche de conexión de rosca hembra, usando igualmente cinta teflón.
8. La manguera del gas se divide en dos secciones, a la primera se le acondiciona una racor tee con rosca hembra, en la cual se conecta el manómetro y la continuación de la manguera; y en el segunda sección, se

adapta el registro de gas y a este, otro tramo de manguera que se dirige hacia el gasómetro.

9. Se muestra una secuencia de imágenes con los respectivos numerales de lo escrito anteriormente.



Secuencia del procedimiento de construcción del digestor convencional.

- DIGESTOR IDENTIFICADO COMO NUEVO PROTOTIPO

La construcción de este digestor se asemeja a lo que se describió para el convencional, sin embargo, las diferencias se explican a continuación.

1. Adicional a los orificios de la parte inferior del bidón, en este reactor se perforo uno de $\frac{3}{4}$ " en un costado superior para la recirculación. Se adaptó también, un flanche para conectar la tubería de PVC, la cual se dirige y se conecta hacia la tubería de entrada usando uniones en tee. Las medidas en este caso se relacionan con la figura 6.
2. Este reactor cuenta con un recubrimiento en poliuretano, por ser una espuma que se adapta a la forma a recubrir, fue necesario realizar un cajón en icopor (poliestireno expandido), una vez puesto el reactor en el cajón, se preparó la mezcla de la espuma y se agregó alrededor del tanque.

3. Por último, se elaboró un invernadero en polietileno, con las siguientes medidas:

Sección	Medida (m)
Largo	1.5
Ancho	1.9
Alto	2.1

A continuación se muestra la secuencia de imágenes de las diferencias entre el sistema convencional y el nuevo prototipo, con los respectivos numerales de lo escrito anteriormente.

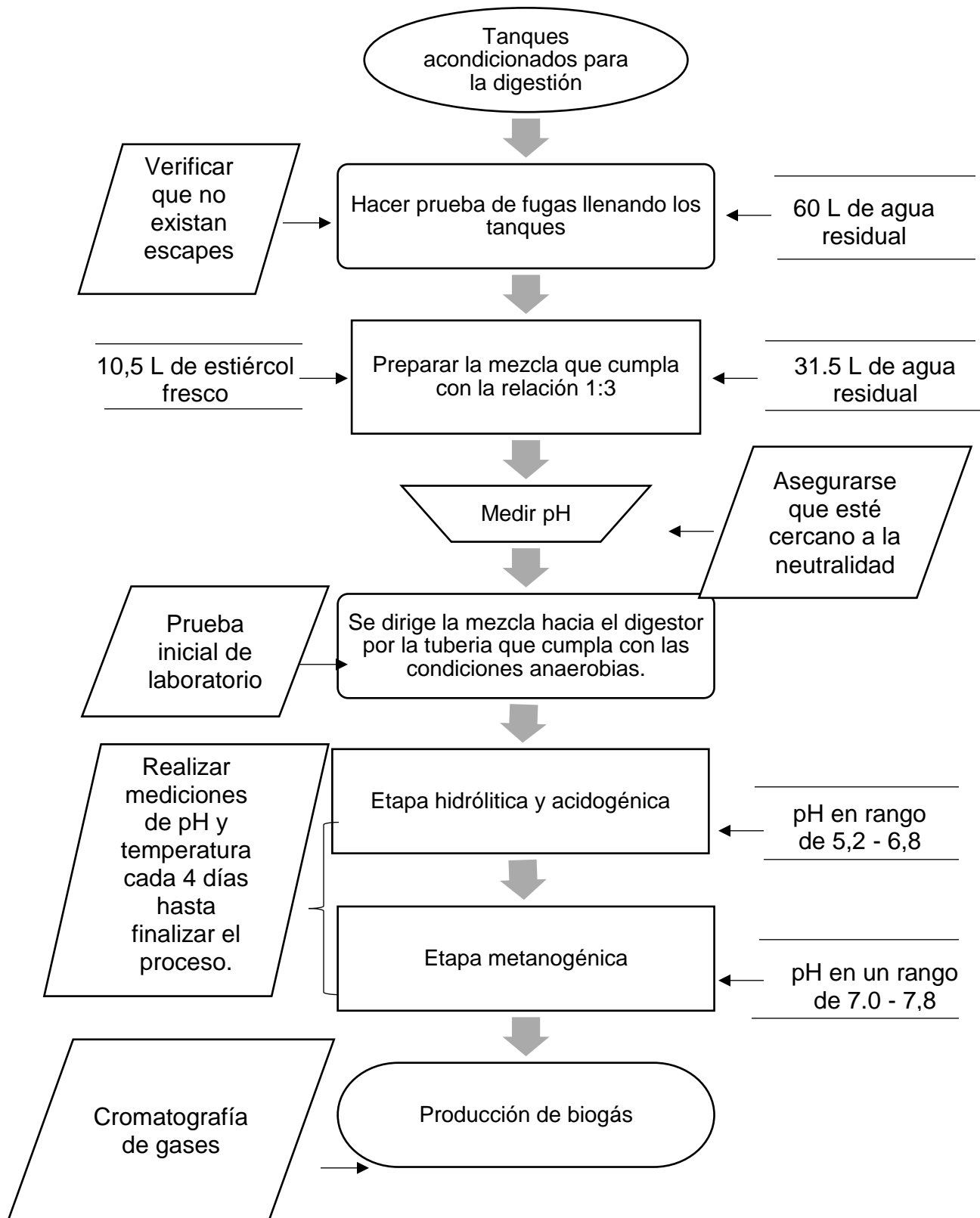


Secuencia de las diferencias entre el digestor convencional y el nuevo prototipo.

ANEXO C.
 INSTRUMENTOS Y MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS
 SISTEMAS DE DIGESTIÓN

CANTIDAD	ELEMENTO	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
2	Bidón 60L hermético	37.414	74.828
2	Balde 5 gal	8.000	16.000
2	Canasta plástica	7.000	14.000
2	Embudo	22.112	44.224
8	Racor macho manguera-rosca	1.640	13.120
8	Capsula en latón	520	4.160
2	Racor Tee 1/4"	4.180	8.360
2	Manguera para gas 3/8"	1.170	2.340
2	Registro de gas	8.700	17.400
2	Gasómetro	-	-
1	Tubo 3/4" PVC x 6m	12.100	12.100
9	Registro 3/4" PVC	2.200	19.800
5	Codo 3/4" PVC	400	2.000
1	Limpiador PVC	1.250	1.250
1	Soldadura PVC	4.350	4.350
1	Cinta teflón	1.200	1.200
6	Flanche tanque 3/4"	9.500	57.000
4	Flanche tanque 1/2"	9.850	39.400
1	Tee 3/4"	550	550
6	Unión 3/4"	400	2.400
1	Tapón 3/4"	600	600
3	Poliuretano rígido	19.500	58.500
1	Plástico de polietileno x5m	30.000	30.000
10	Lámina de icopor 1cm de grosor	1.200	12.000
2	Termómetro bimetálico bulbo 9" -20+120°C	84.180	168.360
2	Manómetro 2" caja negra 0-60 psi	12.500	25.000
	TOTAL		628.942

ANEXO D.
PROCEDIMIENTO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN



ANEXO E. RESULTADOS PRUEBAS DE LABORATORIO

- RESULTADOS PRUEBA DE LABORATORIO DEL SUSTRATO INICIAL.



ASISTENCIA TÉCNICA AGRÍCOLA
CONTROL DE CALIDAD
FOUJAR
SUELOS
AGUAS

Análisis de Control de Calidad	Muestreo	2016-02-04
	Recepción	2016-02-05
	Análisis	2016-02-16
No. CCF 19411	Orden de T.	55216

<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>EMPRESA</td> <td>Fundación Universidad de América</td> </tr> <tr> <td>DIRECCION</td> <td>Avenida Circunvalar No. 20 - 53</td> </tr> <tr> <td>CIUDAD</td> <td>Bogotá</td> </tr> <tr> <td>NIT</td> <td>860,006,806-7</td> </tr> </table>	EMPRESA	Fundación Universidad de América	DIRECCION	Avenida Circunvalar No. 20 - 53	CIUDAD	Bogotá	NIT	860,006,806-7	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>DESCRIPCION:</td> <td>Fertilizante Líquido Orgánico</td> </tr> <tr> <td>IDENTIFICACION:</td> <td>Estiercol Bovino</td> </tr> <tr> <td>CARACTERISTICAS:</td> <td>Líquido color café</td> </tr> <tr> <td>PROCEDENCIA:</td> <td>TABIO CUNDINAMARCA</td> </tr> </table>	DESCRIPCION:	Fertilizante Líquido Orgánico	IDENTIFICACION:	Estiercol Bovino	CARACTERISTICAS:	Líquido color café	PROCEDENCIA:	TABIO CUNDINAMARCA
EMPRESA	Fundación Universidad de América																
DIRECCION	Avenida Circunvalar No. 20 - 53																
CIUDAD	Bogotá																
NIT	860,006,806-7																
DESCRIPCION:	Fertilizante Líquido Orgánico																
IDENTIFICACION:	Estiercol Bovino																
CARACTERISTICAS:	Líquido color café																
PROCEDENCIA:	TABIO CUNDINAMARCA																

REPORTE EN BASE HUMEDA

SOLIDOS TOTALES				METODOS ANALITICOS			
SOLIDOS TOTALES	1.70	%P/P					LBC 35 Gravimetría
N TOTAL	0.07	%P/V					SUMA DE NITROGENOS
FOSFORO TOTAL	0.008	%P/V	P2O5 TOTAL	0.018	%P/V		NTC 234 Colorimetría
C.ORGANICO OXIDABLE TOTAL	0.65	%P/V					NTC 5167 Walkley Black
Rel (C/N)	9.33						
DQO	1.70	%P/V O2					NTC 5167 Walkley Black
SOLIDOS SUSPENDIDOS	0.98	%P/V					LBC 92 Gravimetría
SOLIDOS VOLATILES	1.36	%P/P					LBC 92 Gravimetría

Prohibida la copia total o parcial del presente informe. Toda copia autorizada deberá llevar este sello en original en cada una de sus páginas. Los presentes resultados analíticos corresponden exclusivamente a la muestra recibida en el Laboratorio y no a otros materiales de la misma procedencia.




Angélica Ramírez Vargas
 Jefe Control de Calidad; T.P. 18080


Felipe Calderón Sáenz
 Director General; T.P. 3186

LABORATORIO Y OFICINAS: AV. CRA. 20 No. 87-81 - FAX: 623 65 76 - TELS.: 622 26 87, 622 55 67, 622 49 85, 533 15 59
E-MAIL: calderon@drcalderonlabs.com - WEB SITE: www.drcalderonlabs.com - BOGOTÁ, D.C. - COLOMBIA.

• RESULTADOS PRUEBA DE DQO PARA DIGESTOR 1.



ASISTENCIA TÉCNICA AGRÍCOLA
 CONTROL DE CALIDAD
 FOLIAJES
 SUELOS
 AGUAS

**Análisis de Control
 de Calidad**

No. CCF 19738

Muestreo	2016-04-21
Recepción	2016-04-21
Análisis	2016-04-29
Orden de T.	55801

EMPRESA	Fundación Universidad de América	DESCRIPCION:	LODO
DIRECCION	Avenida Circunvalar No. 20 - 53	IDENTIFICACION:	Tanque 1
CIUDAD	Bogotá	OTROS DATOS:	Estiércol de Vaca Con Agua Residual
NIT	860.006.806-7	CARACTERISTICAS:	Líquido color verde
		Procedencia:	TABIO CUNDINAMARCA

REPORTE EN BASE HUMEDA

MÉTODOS ANALÍTICOS

DQO 45.36 g/L

NTC 5167 Volumetría

Prohibida la copia total o parcial del presente informe. Toda copia autorizada deberá llevar este sello en original y en cada una de sus páginas. Los presentes resultados analíticos corresponden exclusivamente a la muestra recibida en el Laboratorio y no a otros materiales de la misma procedencia.



Amv
 Angélica Ramírez Vargas
 Jefe Control de Calidad; T.P. 18080

F. Calderón Sáenz
 Felipe Calderón Sáenz
 Director General; T.P. 3186

LABORATORIO Y OFICINAS: AV. CAR. 20 No. 87-81 - FAX: 623 65 76 - TELS.: 622 26 87, 622 55 67, 622 49 85, 533 15 59
 E-MAIL: calderon@drcalderonlabs.com - WEB SITE: www.drcalderonlabs.com - BOGOTÁ, D.C. - COLOMBIA.

• RESULTADOS PRUEBA DE DQO PARA DIGESTOR 2.



ASISTENCIA TÉCNICA AGRÍCOLA
CONTROL DE CALIDAD
FOUAR
SUELOS
AGUAS

**Análisis de Control
de Calidad**

No. CCF 19739

Muestreo	2016-04-21
Recepción	2016-04-21
Análisis	2016-04-29
Orden de T.	55801

EMPRESA	Fundación Universidad de América	DESCRIPCION	LODO
DIRECCION	Avenida Circunvarar No. 20 - 53	IDENTIFICACION	Tanque 2
CIUDAD	Bogotá	OTROS DATOS	Estiércol de Vaca Con Agua Residual
NIT	860,006,806-7	CARACTERISTICAS	Líquido color verde
		Procedencia	TABIO CUNDINAMARCA

REPORTE EN BASE HUMEDA

MÉTODOS ANALÍTICOS

DQO 18.05 g/L

NTC 5167 Volumetría

Prohibida la copia total o parcial del presente informe. Toda copia autorizada deberá llevar este sello en original y en cada una de sus páginas. Los presentes resultados analíticos corresponden exclusivamente a la muestra recibida en el Laboratorio y no a otros materiales de la misma procedencia.



[Signature]
Angélica Ramírez Vargas
Jefe Control de Calidad; T.P. 18080

[Signature]
Felipe Calderón Sáenz
Director General; T.P. 3186

LABORATORIO Y OFICINAS: AV. CRA. 20 No. 87-81 - FAX: 623 65 76 - TELS.: 622 26 87, 622 55 67, 622 49 85, 533 15 59
E-MAIL: calderon@drcalderonlabs.com - WEB SITE: www.drcalderonlabs.com - BOGOTÁ, D.C. - COLOMBIA.

• RESULTADOS PRUEBA FINAL DEL SUSTRATO PARA DIGESTOR 1.



ASISTENCIA TÉCNICA AGRÍCOLA
CONTROL DE CALIDAD
FOUARA
SUELOS
AGUAS

Análisis de Control de Calidad

No. CCF 19839

Muestreo	2016-05-05
Recepción	2016-05-05
Análisis	2016-05-17
Orden de T.	55917

EMPRESA	Fundación Universidad de América	DESCRIPCION	LODO
DIRECCION	Avenida Circunvalar No. 20 - 53	IDENTIFICACION	Tanque 1
CIUDAD	Bogotá	CARACTERISTICAS	Lodos color verde
NIT	860.006.806-7	OTROS DATOS	Estiércol de vaca con Agua Residual
		PROCEDENCIA	TABIO CUNDINAMARCA

REPORTE EN BASE HUMEDA

METODOS ANALITICOS

DQO	4.25	%P/V O2
SOLIDOS SUSPENDIDOS	3.93	%P/V
SÓLIDOS TOTALES	4.31	%P/P
SÓLIDOS VOLÁTILES	3.60	%P/P

NTC 5167 Walkley Black
LBC 92 Gravimetría
LBC 35 Gravimetría
LBC 92 Gravimetría

Prohibida la copia total o parcial del presente informe. Toda copia autorizada deberá llevar este sello en original en cada una de sus páginas. Los presentes resultados analíticos corresponden exclusivamente a la muestra recibida en el Laboratorio y no a otros materiales de la misma procedencia.

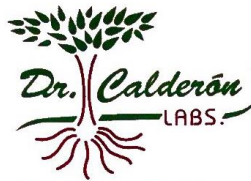


[Signature]
Angélica Ramírez Vargas
Jefe Control de Calidad; T.P. 18080

[Signature]
Felipe Calderón Sáenz
Director General; T.P. 3188

LABORATORIO Y OFICINAS: AV. CAR. 20 No. 87-81 - FAX: 623 65 76 - TELS.: 622 26 87, 622 55 67, 622 49 85, 533 15 59
E-MAIL: calderon@drcalderonlabs.com - WEB SITE: www.drcalderonlabs.com - BOGOTÁ, D.C. - COLOMBIA.

• RESULTADOS PRUEBA FINAL DEL SUSTRATO PARA DIGESTOR 2.



ASISTENCIA TÉCNICA AGRÍCOLA
CONTROL DE CALIDAD
FOUARA
SUELOS
AGUAS

Análisis de Control de Calidad		Muestreo	2016-05-05
No. CCF 19840		Recepción	2016-05-05
		Análisis	2016-05-17
		Orden de T.	55917
EMPRESA	Fundación Universidad de América	DESCRIPCION	LODO
DIRECCION	Avenida Circunvalar No. 20 - 53	IDENTIFICACION	Tanque 2
CIUDAD	Bogotá	CARACTERISTICAS	Lodos color verde
NIT	860,006,806-7	OTROS DATOS	Estiércol de vaca con Agua Residual
		PROCEDENCIA	TABIO CUNDINAMARCA

REPORTE EN BASE HUMEDA

DQO	2.85	%P/V O2
SOLIDOS SUSPENDIDOS	3.18	%P/V
SÓLIDOS TOTALES	3.38	%P/P
SÓLIDOS VOLÁTILES	2.76	%P/P

MÉTODOS ANALÍTICOS

NTC 5167 Walkley Black
LBC 92 Gravimetría
LBC 35 Gravimetría
LBC 92 Gravimetría

Prohibida la copia total o parcial del presente informe. Toda copia autorizada deberá llevar este sello en original en cada una de sus páginas. Los presentes resultados analíticos corresponden exclusivamente a la muestra recibida en el Laboratorio y no a otros materiales de la misma procedencia.



AmvR
Angélica Ramírez Vargas
 Jefe Control de Calidad; T.P. 18080

pp: Katherine Lucio
Felipe Calderón Sáenz
 Director General; T.P. 3186

LABORATORIO Y OFICINAS: AV. CRA. 20 No. 87-81 - FAX: 622 65 76 - TELS.: 622 26 87, 622 55 67, 622 49 85, 533 15 59
 E-MAIL: calderon@drcalderonlabs.com - WEB SITE: www.drcalderonlabs.com - BOGOTÁ, D.C. - COLOMBIA.

ANEXO F.
ESPECIFICACIONES DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO Método de reflujo abierto		
CÓDIGO GENERAL	008	Código
1. SUMARIO Y APLICACIONES		
<p>1. La demanda química de oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua residual, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo.</p> <p>2. Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan mediante reflujo en solución fuertemente ácida (H_2SO_4) con un exceso conocido de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en presencia de sulfato de plata (Ag_2SO_4) que actúa como agente catalizador, y de sulfato mercúrico ($HgSO_4$) adicionado para remover la interferencia de los cloruros. Después de la digestión, el remanente de $K_2Cr_2O_7$ sin reducir se titula con sulfato ferroso de amonio; se usa como indicador de punto final el complejo ferroso de ortofenantrolina (ferroína). La materia orgánica oxidable se calcula en términos de oxígeno equivalente.</p> <p>3. Para muestras de un origen específico, la DQO se puede relacionar empíricamente con la DBO, el carbono orgánico o la materia orgánica; la prueba se usa para controlar y monitorear después que se ha establecido la correlación.</p> <p>4. El método es aplicable a muestras de aguas residuales domésticas e industriales que tengan DBO superiores a $50\text{mg } O_2/L$. Para concentraciones más bajas, tales como muestras de aguas superficiales, se puede usar el método modificado para bajo nivel en un intervalo entre 5 y $50\text{mg } O_2/L$. Cuando la concentración de cloruro en la muestra es mayor de $2\ 000\text{ mg/L}$, se requiere el método modificado para las aguas salinas.</p>		
2. LIMITACIONES E INTERFERENCIAS		
<p>1. Los compuestos alifáticos volátiles de cadena lineal no se oxidan en cantidad apreciable, en parte debido a que están presentes en la fase de vapor y no entran en contacto con el líquido oxidante; tales compuestos se oxidan más efectivamente cuando se agrega Ag_2SO_4 como catalizador. Sin embargo, éste reacciona con los iones cloruro, bromuro y yoduro produciendo precipitados que son oxidados parcialmente.</p> <p>2. Las dificultades causadas por la presencia de los haluros pueden superarse en buena parte, aunque no completamente, por acomplejamiento antes del proceso de reflujo con sulfato de mercurio ($HgSO_4$), que forma el haluro mercúrico correspondiente, muy poco soluble en medio acuoso. Si bien se especifica 1 g de $HgSO_4$ para 50 mL de muestra, se puede usar una menor cantidad cuando la concentración de cloruro sea menor de $2\ 000\text{ mg/L}$, mientras se mantenga una relación $HgSO_4:Cl^-$ de $10:1$. La técnica no se</p>		

<p>debe usar para muestras que contengan más de 2 000 mg de Cl⁻/L; existen otros procedimientos diseñados para determinar la DQO en aguas salinas.</p> <p>3.El nitrito (NO₂⁻) tiene una DQO de 1,1 mg de O₂/mg de NO₂⁻-N, y como las concentraciones de NO₂⁻ en aguas rara vez son mayores de 1 o 2 mg NO₂⁻-N/L, esta interferencia es considerada insignificante y usualmente se ignora. Para evitar una interferencia significativa debida al NO₂⁻, agregar 10 mg de ácido sulfámico por cada mg de NO₂⁻-N presente en el volumen de muestra usado; agregar la misma cantidad de ácido sulfámico al blanco de agua destilada.</p> <p>4.Las especies inorgánicas reducidas, tales como iones ferroso, sulfuro, manganeso, etc., se oxidan cuantitativamente bajo las condiciones de la prueba; para concentraciones altas de estas especies, se pueden hacer las correcciones al valor de DQO obtenido, según los cálculos estequiométricos en caso de conocer su concentración inicial.</p>
<p>3. TOMA Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS</p>
<p>1.Colectar las muestras en botellas de vidrio preferiblemente; el uso de envases plásticos es permisible si se asegura la ausencia de contaminantes orgánicos.</p> <p>2.Si la muestra tiene materia orgánica biológicamente activa, el análisis debe realizarse inmediatamente, aunque preservada a pH £ 2 por adición de H₂SO₄ conc. (generalmente 2 mL de H₂SO₄ conc./L de muestra) puede analizarse hasta siete días después.</p> <p>3.Las muestras que contengan sólidos sedimentables deben mezclarse con un homogeneizador para obtener una muestra representativa.</p> <p>4.En el análisis de aguas residuales con alta DQO deben hacerse diluciones preliminares, para reducir el error inherente en la medida de pequeños volúmenes de muestra.</p>
<p>4. APARATOS</p>
<p>4.1. Equipo de reflujo, constituido por balones o tubos de digestión de 500 o 250 mL de capacidad con boca 24/40 de vidrio esmerilado y condensador Liebig, West, Friedrichs, Allihn o equivalente, de 300 mm, con unión 24/40 de vidrio esmerilado, y una plancha de calentamiento con regulador de temperatura y potencia suficiente para producir al menos 1,4 W/cm² de superficie de calentamiento, o su equivalente.</p>
<p>5. REACTIVOS</p>
<p>1.Solución estándar de dicromato de potasio, 0,0417 M. Disolver 12,259 g de K₂Cr₂O₇, grado estándar primario previamente secado durante 2 h a 103°C, en agua destilada y diluir a 1 000 mL en un balón volumétrico clase A.</p> <p>2.Reactivo de ácido sulfúrico. Agregar con cuidado Ag₂SO₄ grado reactivo o técnico, en cristales o en polvo, sobre H₂SO₄ concentrado en proporción de 5,5g de Ag₂SO₄/Kg de H₂SO₄. Dejar en reposo 1 o 2 días para la disolución del Ag₂SO₄.</p> <p>3.<i>Solución indicadora de ferroina.</i> Disolver 1,485 g de 1,10-fenantrolina</p>

monohidratada y 695 mg de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en agua destilada y diluir a 100 mL. Esta solución también se puede adquirir comercialmente.

4. Sulfato ferroso de amonio (FAS), 0,25 M. Disolver 98 g de $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en agua destilada; agregar 20 mL de H_2SO_4 concentrado, enfriar y diluir a 1000 mL. Estandarizar esta solución diariamente con una solución estándar de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ así:
Diluir 10,0 mL de la solución estándar de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ a aproximadamente 100 mL; agregar 30 mL de H_2SO_4 concentrado y enfriar. Titular con FAS en presencia de 0,10 a 0,15 mL (2 o 3 gotas) de indicador de ferroina.
Molaridad del FAS =
Volumen de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0.0417 M titulado, mL /Volumen del FAS empleado, mL * 0.25
5. Sulfato mercúrico, HgSO_4 , en cristales o en polvo.
6. Ácido sulfámico. Requerido solamente para eliminar la interferencia de nitritos.
7. Ftalato de potasio e hidrógeno estándar (biftalato de potasio, KHP). Triturar ligeramente y secar el biftalato de potasio ($\text{HOOC}_6\text{H}_4\text{COOK}$) hasta peso constante a 120°C ; disolver 425 mg en agua destilada y diluir a 1 000 mL. La solución es estable por más de tres meses si se conserva refrigerada; se debe verificar la presencia o ausencia de crecimiento biológico, y en caso afirmativo descartarla. El biftalato tiene una DQO teórica de 1,176 mg O_2 /mg y la solución tiene una DQO teórica de 500 mg O_2 /mL.

6. PROCEDIMIENTO

1. Tratamiento de muestras con DQO > 50 mg O_2 /L: Colocar 50,0 mL de muestra en un balón de reflujo de 500-mL (para muestras con DQO > 900 mg O_2 /L, usar una porción más pequeña de muestra y diluirla a 50,0 mL); agregar 1 g de HgSO_4 , en presencia de perlas de vidrio para controlar la ebullición, y muy lentamente agregar 5,0 mL del reactivo de ácido sulfúrico, mientras se agita para disolver el HgSO_4 . Enfriar y agitar para evitar la posible pérdida de materiales volátiles; agregar 25 mL de solución de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,0417 M y mezclar. Acoplar el balón al condensador y abrir el flujo de agua refrigerante; agregar el remanente del reactivo de ácido sulfúrico (70 mL) a través del extremo superior del condensador. Continuar la agitación mientras se agrega el reactivo de ácido sulfúrico.
PRECAUCIÓN: *Agitar muy bien la mezcla de reflujo antes de suministrar calor para prevenir el sobrecalentamiento en el fondo del balón y la formación de espuma.*
2. Cubrir el extremo superior del condensador con un vaso pequeño para prevenir la entrada de materiales extraños a la mezcla y dejar en reflujo durante 2 h. Enfriar y enjuagar el condensador desde la parte superior con agua destilada; desconectar el condensador y diluir la muestra al doble de su volumen con agua destilada. Enfriar hasta temperatura ambiente y valorar el exceso de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ con FAS en presencia de 0,10 a 0,15 mL (2 o 3 gotas) de indicador de ferroina; aunque la cantidad de ferroina no es crítica,

usar el mismo volumen para todas las titulaciones. Tomar como punto final de la titulación el primer cambio nítido de color azul-verdoso a café-rojizo; el color azul-verdoso puede reaparecer. El cambio de color no es tan marcado como en la titulación del blanco de reactivos debido a la mayor concentración de ácido en la muestra. De la misma manera, someter a reflujo y titular un blanco que contenga los reactivos y un volumen de agua destilada igual al volumen de muestra.

3. Procedimiento alternativo para muestras con DQO-bajo: Seguir el procedimiento anterior, con dos excepciones: (i) usar $K_2Cr_2O_7$ estándar 0,00417 M, y (ii) titular con FAS 0,025 M. Tener cuidado extremo, ya que cualquier traza de materia orgánica en la vidriería o deposiciones desde la atmósfera pueden causar errores. Si se requiere un mayor aumento de la sensibilidad, concentrar un mayor volumen de muestra antes de la digestión por reflujo, de la siguiente manera: Agregar todos los reactivos a la muestra y reducir el volumen total a 150 mL mediante ebullición en el balón de reflujo abierto a la atmósfera (sin acoplar el condensador). Calcular la cantidad de $HgSO_4$ a ser adicionada (antes de la concentración por ebullición), basada en una relación de peso $HgSO_4:Cl^-$ de 10:1, según la cantidad de Cl^- presente en el volumen de muestra original. Hacer un blanco de reactivos mediante el mismo procedimiento. Esta técnica tiene la ventaja de concentrar la muestra sin pérdidas significativas de materiales volátiles fácilmente digestibles; los materiales volátiles difíciles de digerir, tales como ácidos volátiles, se pierden pero se consigue una mejoría frente a métodos de concentración por evaporación ordinarios.
4. Determinación de la solución estándar. Evaluar la técnica y la calidad de reactivos realizando la prueba con una solución estándar de ftalato ácido de potasio.

7. CÁLCULOS

DQO como mg de O_2/l = $(A-B) \times M \times 8000/mL$ de Muestra

Dónde:

A = mL FAS usados para el blanco

B = mL FAS usados para la muestra, y

M = molaridad del FAS

8. PRECISIÓN

8.1. Un grupo de muestras sintéticas preparadas con ftalato ácido de potasio y NaCl se analizaron en 74 laboratorios. Para los valores de la DQO de 200 mg O_2/L en ausencia de Cl^- , la desviación estándar obtenida fue ± 13 mg/L (coeficiente de variación 6,5 %); para los valores de la DQO de 160 mg O_2/L y 100 mg Cl^-/L , la desviación estándar obtenida fue de ± 14 mg/L (coef. variación, 10,8%).

9. QUÍMICO RESPONSABLE

Elaboración del Protocolo: *Laboratorio de Química Ambiental Ideam*

Estandarización de la Técnica: *Laboratorio de Química Ambiental*

10. FECHAS
Elaboración del Protocolo: <i>julio de 1997</i> Montaje de la Técnica: Calibración: Revisión: <i>julio de 1997</i>
11. REFERENCIAS
Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 19 ed., New York, 1995. pp 5-12 a 5-16. Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, 1983.
12. BIBLIOGRAFÍA
RODIER, J. Análisis de Aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar. Omega, Barcelona, 1981. SAWYER, C.; McCARTY, P. Chemistry for Environmental Engineering. McGraw Hill, New York, 1996 GARAY, J., PANIZZO, L., LESMES, L., RAMIREZ, G., SANCHEZ, J. Manual de Técnicas Analíticas de Parámetros Físico-químicos y Contaminantes Marinos. Tercera edición. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Cartagena, 1993

ANEXO G.
REGISTROS DE TEMPERATURA AMBIENTAL

DÍA	FECHA	TEMPERATURA °C			
		5:00 A.M.	11:00 A.M.	4:00 P.M.	8:00 P.M.
1	13-ene	6	25	21	15
2	14-ene	7	22	21	11
3	15-ene	4	22	21	11
4	16-ene	3	24	20	12
5	17-ene	2	24	21	13
6	18-ene	3	22	21	12
7	19-ene	1	21	22	10
8	20-ene	7	22	22	13
9	21-ene	6	25	25	16
10	22-ene	11	26	24	15
11	23-ene	6	26	24	16
12	24-ene	6	26	22	13
13	25-ene	7	25	18	12
14	26-ene	6	22	22	11
15	27-ene	5	22	22	14
16	28-ene	5	30	24	14
17	29-ene	7	23	23	14
18	30-ene	5	24	21	14
19	31-ene	7	27	23	14
20	01-feb	7	28	24	16
21	02-feb	5	26	24	14
22	03-feb	5	27	22	13
23	04-feb	16	25	22	12
24	05-feb	4	22	22	11
25	06-feb	5	21	19	12
26	07-feb	9	20	17	15
27	08-feb	13	21	17	14
28	09-feb	8	20	16	13
29	10-feb	9	18	18	11
30	11-feb	6	22	17	10
31	12-feb	7	22	16	9
32	13-feb	8	18	17	10
33	14-feb	6	20	18	11
34	15-feb	5	21	14	13
35	16-feb	8	22	18	12

36	17-feb	8	22	16	11
37	18-feb	8	23	18	10
38	19-feb	9	22	17	11
39	20-feb	5	21	14	9
40	21-feb	4	12	9	5
41	22-feb	11	18	15	9
42	23-feb	12	22	19	12
43	24-feb	10	22	22	15
44	25-feb	12	25	14	14
45	26-feb	11	18	15	11
46	27-feb	9	20	14	10
47	28-feb	8	19	16	12
48	29-feb	9	25	17	12
57	09-mar	9	16	22	14
58	10-mar	10	20	24	19
59	11-mar	5	22	17	14
60	12-mar	8	22	17	11
61	13-mar	5	21	15	12
88	09-abr	5	24	25	17
89	10-abr	8	22	19	16
90	11-abr	10	26	17	14
91	12-abr	8	28	23	18
92	13-abr	11	18	16	14
93	14-abr	13	20	18	15
94	15-abr	9	24	20	13
95	16-abr	8	22	18	16
96	17-abr	7	21	18	15
97	18-abr	13	20	18	16
98	19-abr	8	22	18	13
99	20-abr	9	22	21	11
100	21-abr	6	26	24	15
101	22-abr	11	26	20	18
102	23-abr	10	22	18	15
103	24-abr	9	19	16	13
104	25-abr	9	25	21	16
105	26-abr	9	25	18	16
106	27-abr	8	20	17	15
107	28-abr	7	23	19	17
108	29-abr	6	22	17	16

ANEXO H.
REGISTROS DE TEMPERATURA INTERNA DE LOS DIGESTORES

DIA	FECHA	HORA	DIGESTOR CONVENCIONAL	DIGESTOR NUEVO PROTOTIPO
			TEMPERATURA °C	TEMPERATURA °C
4	18/02/2016	11:00:00 a. m.	20	18
11	25/02/2016	12:00:00 p. m.	19	18
18	03/03/2016	11:24:00 a. m.	19	18
23	08/03/2016	11:15:00 a. m.	19	18
25	10/03/2016	9:57:00 a. m.	19	18
29	14/03/2016	10:45:00 a. m.	19	18
34	19/03/2016	11:00:00 a. m.	19	18
39	24/03/2016	11:00:00 a. m.	18	17
43	28/03/2016	11:45:00 a. m.	19	18
48	02/04/2016	11:19:00 a. m.	19	18
53	07/04/2016	9:59:00 a. m.	19	18
58	12/04/2016	9:52:00 a. m.	19	18
64	18/04/2016	1:00:00 p. m.	18	17
67	21/04/2016	11:30:00 a. m.	18	17
71	25/04/2016	11:00:00 a. m.	18	17
74	28/04/2016	9:38:00 a. m.	18	17
79	03/05/2016	11:00:00 a. m.	18	17
81	05/05/2016	11:15:00 a. m.	19	17
85	09/05/2016	4:51:00 a. m.	18	17
89	13/05/2016	10:11:00 a. m.	18	17
91	15/05/2016	1:33:00 a. m.	18	17


ANEXO I.
DATOS DE PH PARA LOS DIGESTORES

			DIGESTOR CONVENCIONAL	DIGESTOR NUEVO PROTOTIPO
DIA	FECHA	HORA	pH	pH
18	03/03/2016	11:24:00 a. m.	6,1	6,2
23	08/03/2016	11:15:00 a. m.	5,9	6
25	10/03/2016	9:57:00 a. m.	5,8	5,8
29	14/03/2016	10:45:00 a. m.	5,8	5,5
34	19/03/2016	11:00:00 a. m.	5,7	6,9
39	24/03/2016	11:00:00 a. m.	5,7	6,2
43	28/03/2016	11:45:00 a. m.	5,7	5,7
48	02/04/2016	11:19:00 a. m.	5,7	5,9
53	07/04/2016	9:59:00 a. m.	6,1	6,1
58	12/04/2016	9:52:00 a. m.	6,4	6,4
64	18/04/2016	1:00:00 p. m.	6,4	6,5
67	21/04/2016	11:30:00 a. m.	6,5	6,2
71	25/04/2016	11:00:00 a. m.	6,7	6,3
74	28/04/2016	9:38:00 a. m.	6,4	6,1
79	03/05/2016	11:00:00 a. m.	6,4	7,3
81	05/05/2016	11:15:00 a. m.	6,4	7,2
85	09/05/2016	4:51:00 a. m.	6,5	6,4
89	13/05/2016	10:11:00 a. m.	6,4	6,4
91	15/05/2016	1:33:00 a. m.	6,8	7,2

ANEXO J.
PROCEDIMIENTO DE COLORACIÓN DE GRAM

1. Se obtuvo una muestra del sustrato el día 19 para sembrarlo en tres cultivos diferentes, BHI, carboximetil y almidón; y se encubieron a temperatura de 30°C.
2. Pasadas las 48 horas, se procedió a tomar los cultivos para realizarles la tinción de Gram. Para esto, inicialmente se esteriliza con fuego un asa bacteriológica, para luego colocar una gota de agua sobre el portaobjetos, se vuelve a esterilizar para luego transferir una pequeña muestra de uno de los cultivos al portaobjetos y homogeneizar suavemente con el agua. Así se repitió para cada siembra.
3. Se fija la muestra usando calor, pasando el portaobjetos dos o tres veces por la llama de un mechero.
4. Se adiciona cristal violeta sobre el portaobjetos, se deja reposar durante 60 segundos y se enjuaga suavemente con agua.
5. Se agrega alcohol, este se deja reposar por 30 segundos y se enjuaga.
6. Se empapa con colorante secundario para agregar un contraste entre las bacterias Gram positivas y las Gram negativas, se deja actuar durante 60 segundos y se enjuaga.
7. Finalmente se prepara el microscopio para analizar el resultado, colocando el portaobjetos bajo el lente, se enfoca con un aumento de 300x, se adiciona una gota de aceite en el portaobjetos y se procede a observar e identificar las bacterias Gram positivas (violetas) y Gram negativas (rosadas).

ANEXO K. RESULTADOS DE CROMATOGRAFÍA DE GASES.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA	INFORME DE ENSAYO	Código: FA006001 Versión: 01 Vigencia: 16/07/2012 Página 1 de 2
---	--------------------------	--

Consecutivo No. 064 – 2016
Fecha 2016-02-15

Empresa	Fundación Universidad de América		
Nombre	Daniela Bernal		
Dirección	Avenida Circunvalar No. 1 - 53	Teléfono:	3212387707
Correo electrónico	Danielabernal19@hotmail.com		

Ensayo	Cromatografía de gases
Orden de trabajo	LQUI 031 2016

Muestra		Ejecución del ensayo	
Consecutivo	LQUI 031 2016	Fecha inicio	26/05/2016
Fecha de recepción	25/05/ 2016	Fecha fin	3/06/ 2016
Cantidad	2 muestras		

1. MÉTODO DE ENSAYO

Preparación de las muestras	Ninguna
Normas o especificación aplicable	Las que se consignan en las tablas de resultados de la sección 4.1
Desviación adiciones ó exclusiones de la norma o especificación	Ninguna

2. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra No.	Descripción	Observaciones iniciales
031A	Biogas / T1 Tanque	Ninguna
031B	Biogas / T2 Tanque	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, usando Helio como gas de arrastre
Inyector	Temperatura 100°C
Columna	Malla molecular 5ª
Tamaño	0,5 ml

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_fiqbog@unal.edu.co
 Bogotá, Colombia, Sur América

4. RESULTADOS

Muestra: Biogás 031A

Compuesto	Tiempo de retenc [min]	Área [mV.s]	Área [mV.s]	Área [mV.s]	Area prom	% vol
H2	0,671	n.d	n.d	n.d		n.d*
O2	1,262	16135,1	16285,7	16498,8	16306,6	14,2
CH4	5.529	48314,7	48459,5	48946,7	48573,6	58,3

*n.d No detectado, por debajo del límite de detección (<0,5% v/v)

Muestra: Biogás 031B

Compuesto	Tiempo de retenc [min]	Área [mV.s]	Área [mV.s]	Área [mV.s]	Area prom	% vol
H2	0,671	n.d	n.d	n.d		n.d*
O2	1,262	12315,6	12269,2	12763,0	12449,3	10,7
CH4	5.529	53647,3	52905,5	53835,9	53462,9	64,2

*n.d No detectado, por debajo del límite de detección (<0,5% v/v)



ING. LUIS FERNANDO CORDOBA.
Coordinador.

ANEXO L.
PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL ANOVA.

El Anova debe tener inicialmente en sus datos un factor con K niveles y n replicas para obtener datos de variable de respuesta la cual es dependiente. La tabla de datos inicial se denota de la siguiente manera:

Y11	Y21	Y31	YK1	K niveles
Y12	Y22	Y32	YK2	n Replicas
Y13	Y23	Y33	YK3	N = K * n
Y14	Y2n	Y3n	YKn	
Y1.	Y2.	Y3.	YK.	

$$\sum Y_i = Y_{..}$$

Una vez se tienen los datos, se procede a realizar los cálculos para realizar la tabla Anova como se muestra a continuación.

- Suma de cuadrados totales. (SCT)

$$\sum \sum Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N}$$

- Suma de cuadrados entre tratamientos. (SCE)

$$\sum \frac{Y_{i.}^2}{n} - \frac{Y_{..}^2}{N}$$

- Suma de cuadrados dentro de tratamientos. (SCD)

$$SCT = SCE + SCD$$

- Cuadrado medio entre tratamientos. (CME)

$$CME = \frac{SCE}{K - 1}$$

- Cuadrado medio dentro de tratamientos. (CMD)

$$CMD = \frac{SCD}{N - K}$$

- Cuadrado medio total. (CMT)

$$CMT = \frac{SCT}{N - 1}$$

- Tabla Anova.

Fuentes de variación	Sumas de cuadrados	G.L	Cuadrados medios	F
Entre tratamientos	SCE	K-1	CME	F _c = CME/CMD
Dentro de tratamientos	SCD	N-K	CMD	
Total	SCT	N-1	CMT	

- Calculo de F de tablas.

$$F_{\alpha, K-1, N-K}$$